

01129
58

A



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DESARROLLO DE UN SISTEMA BASADO EN LOGICA DIFUSA
PARA EL CONTROL DE REACTORES NUCLEARES BWR's

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICO Y ELECTRONICO
(AREA ELECTRICA)
P R E S E N T A :

ANTONIO TAVARES MANCILLAS



DIRECTOR DE TESIS: DR. JUAN LUIS FRANCOIS LACOUTURE

CIUDAD UNIVERSITARIA MEXICO, D. F.

2003



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

13

Agradecimientos.

Podría agradecer a mucha gente que me ha ayudado a la realiza de este trabajo, pero no cabe duda que la persona que me ha guiado de manera sobrada ha sido el Dr. Juan Luis Francois Lacounture, y a él le doy las gracias en particular por su confianza y su paciencia.

Doy las gracias también a la Facultad de Ingeniería, por ser parte integral de mi formación, y en especifico a cada uno de mis profesores que tuve en el transcurso de mis estudios.

C

Dedicatoria.

Dedico este trabajo a la Sra. Raquel López y al Sr. Antonio Tavares, mis padres, que han sido una pieza maestra en los avatares que he tenido en toda mi trayectoria estudiantil.

Pienso en lo que soy, y se que todos mis acierto se deben en gran parte a la bondad de mis padres, a la confianza que me han proporcionado en todo este tiempo, y la bonanza que me ha cobijado es en gran parte a su sacrificio.

I

Contenido

Lista de Figuras.....	III
Introducción.....	V
1. Lógica difusa.....	1
1.1. ¿Qué es la lógica difusa?.....	1
1.2. Sistemas difusos.....	2
1.3. Conjuntos difusos.....	3
1.3.1. Conjunto de operaciones difusas.....	5
1.3.2. Principales propiedades de los conjuntos difusos.....	6
1.4. Sistema de control difuso.....	6
1.4.1. Difusión.....	6
1.4.2. Proceso difuso.....	7
1.4.3. Desdifusión.....	10
2. Fisión nuclear.....	13
2.1. Reacción nuclear.....	13
2.1.1. Energía en la fisión nuclear.....	13
2.1.2. Factor de multiplicación de neutrones, k	15
2.2. Reactores nucleares BWR's.....	16
2.2.1. La vasija.....	16
2.2.2. El sistema de seguridad.....	17
2.2.3. El núcleo.....	19
2.2.4. Sistema de recirculación.....	20
2.2.5. Separador y secador de vapor.....	21
3. Respuesta de la potencia en el núcleo.....	28
3.1. Potencia en el núcleo.....	28
3.2. Barras de control.....	28
3.2.1. Barras someras.....	29
3.2.2. Barras profundas.....	30
3.3. Flujo de recirculación.....	30
4. Control difuso.....	35
4.1. El control y sus variables difusas.....	35
4.2. El control por barras.....	36
4.2.1. Las variables difusas.....	36
4.2.2. Los conjuntos difusos.....	37
4.2.3. Reglas difusas.....	40
4.3. El control por flujo de recirculación.....	40
4.3.1. Las variables difusas.....	40
4.3.2. Los conjuntos difusos.....	41
4.3.3. Reglas difusas.....	42
4.4. La inferencia.....	43
4.5. Desdifuzificación.....	45
5. El sistema.....	46
5.1. El sistema reactor nuclear.....	46
5.2. El sistema de control difuso del reactor nuclear BWR.....	46

6. Resultados.....	50
6.1. Consideraciones al sistema reactor nuclear.....	50
6.2. Pruebas realizadas.....	51
7. Conclusiones.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXO. Pruebas independientes de los controles difusos.....	67

Lista de Figuras.

1. Diagrama de bloques que representa un sistema de control difuso en lazo cerrado.....	3
2. Representación de un número difuso "casi cero".....	3
3. Partes de una función de membresía.....	5
4. Proceso de difuzificación.....	7
5. Agregación de un sistema.....	9
6. Método del centroide.....	10
7. Método el centro de sumas.....	11
8. Método de máxima membresía.....	12
9. Reacción en cadena.....	14
10. Diagrama de un reactor nuclear BWR.....	22
11. Estructura de una barra de control.....	23
12. Arreglo de la vasija del reactor BWR para el sistema de recirculación de la bomba de chorro.....	24
13. Barreras de contención de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde.....	25
14. Diagrama de la carga inicial de combustible.....	19
15. Elemento Combustible.....	26
16. Sistema de recirculación	20
17. Ubicación del separador y secador de vapor.....	27
18. Respuesta de la potencia a las barras de control someras.....	32
19. Respuesta de la potencia a las barras de control profundas....	33
20. Respuesta de la potencia al flujo de recirculación.....	34
21. Diagrama del sistema de control difuso del primer sistema....	37
22. Variable difusa k (primer sistema).....	37
23. Variable difusa p_{nrm} (primer sistema).....	38
24. Variable difusa b_{cp} (primer sistema).....	39
25. Variable difusa b_{cs} (primer sistema)	39
26. Diagrama del sistema de control difuso del segundo sistema....	41

27. Variable difusa <i>k</i> (segundo sistema).....	41
28. Variable difusa <i>flujo</i> (segundo sistema).....	42
29. Comparación de diferentes implicaciones utilizando FUZZLE 3.0 para el inciso (a).....	45
30. Comparación de diferentes implicaciones utilizando FUZZLE 3.0 para el inciso (b).....	45
31. Diagrama de flujo del sistema.....	49
32. Gráficas de los resultados.....	58

INTRODUCCIÓN

Los procesos de control que el hombre ha tratado de llevar a cabo, han sido imitaciones de la naturaleza, esta copia de cualquier fenómeno ha estado limitada por el razonamiento que lleva a cabo en su proceder. Dicha restricción es resultado de la lógica empleada que coadyuva al análisis del problema en cuestión.

El deseo de imperar un fenómeno cualquiera, debe de tomar en cuenta un número grande de variables, que utilizando los procedimientos clásicos implica la manipulación de gran cantidad de información, la solución de ecuaciones complejas que simulen los procesos, etc. Así que cuando se busca dominar un proceso, la línea que se debe tomar surgirá del razonamiento que se utilice, si el razonamiento ayuda a visualizar la mayor cantidad de matices del proceso, se estará esculpiendo con un mayor grado de certidumbre tal fenómeno.

El presente trabajo muestra una forma de proceder hacia la solución de un problema de control de un proceso cualquiera, este procedimiento elimina en cierto grado el manejo de ecuaciones complejas y la manipulación de gran cantidad de información -como se describe en el párrafo anterior-, que son producto de la lógica clásica utilizada, esto no quiere decir que la lógica alternativa que se describe en este trabajo este en desacuerdo con la clásica, al contrario, pueden convivir en un mismo sistema.

Ya en esta parte se puede hablar de una mejor forma de modelar los fenómenos de tal manera que su réplica pueda manipularse mejor y se logre un mejor dominio del propio fenómeno.

El presente trabajo, es referido a la utilización de la lógica difusa para reproducir de manera natural un sistema. ¿El sistema?, el sistema puede ser cualquiera, la importancia es poder ver al control ya no como un sistema bivalente, sino como un sistema multivalente capaz de conducirse con una lógica más flexible y apegada a la realidad que pueda proyectar un rango mucho mayor de posibilidades para actuar sin necesidad de manejar los complicados procesos matemáticos de la lógica clásica, es decir, se vislumbra mejor el fenómeno pero utilizando menos algoritmos de análisis.

Para alcanzar el objetivo de controlar un sistema por medio de una lógica alternativa como lo es la difusa, se selecciona un reactor nuclear, ya que por ser un sistema muy complejo, su modelado requiere de un conocimiento arduo y multidisciplinario, por lo que al tratarlo con la lógica difusa, esta compleja estructura matemática se transforma en un sistema mucho más sencillo y claro.

El sistema escogido es un reactor nuclear de agua en ebullición (BWR, de sus siglas en inglés). El ejemplo que se utiliza en esta tesis, es un simulador del reactor BWR de la central nucleoelectrónica Laguna Verde, ubicada en el Estado de Veracruz.

Este simulador permite recrear las condiciones de operación que se efectúan en el núcleo del reactor de la central nucleoelectrónica, así que, al ser un simulador, es manejado mediante un lenguaje de programación,

por lo que el control difuso como producto final, será un algoritmo acondicionado para imperar al sistema.

El razonamiento difuso se lleva a cabo por medio -inicialmente- de la coadyuvanza entre el diseñador del control y un experto del sistema a dominar. Así que, ya no se toman en cuenta por ejemplo, las ecuaciones físicas del reactor, sino ahora se busca el consejo del experto para que "platique" del comportamiento del núcleo del reactor y así transformar esa experiencia por medio de un razonamiento difuso a un lenguaje más apegado a la realidad.

Este traslado de datos es sugerido por la lógica difusa, ampliando el control del sistema, ya que después de la consulta del experto, existe la etapa de afinamiento donde se van moldeando de manera más suave las curvas de respuesta que permitirán un resultado satisfactorio, sin la necesidad de involucrar modelos matemáticos.

En este punto se enfatizará el objetivo que busca este trabajo de tesis: controlar un sistema complejo-en este caso, un reactor nuclear en agua en ebullición- proponiendo una lógica alternativa -siendo esta la lógica difusa- que permite analizarlo de manera sencilla.

No se debe de pensar que esta lógica alternativa es superior a la lógica clásica, sino que, como su atributo lo indica, es una alternativa de razonar un problema y darle solución, es decir, es otro camino para imperar un sistema, donde la ventaja que se enmarca, es la utilización de razonamientos que no necesariamente utilizan modelos matemáticos, que no necesariamente necesitan un conocimiento profundo del sistema.

La metodología para llegar a este objetivo es el siguiente:

- Se plantean las variables de control con la ayuda de conocimientos básicos del sistema y con el auxilio de un experto en el sistema propuesto.
- Las variables identificadas se transportarán de tal manera que se integren a conjuntos difusos, es decir, pasarán del mundo de la lógica clásica al mundo de la lógica difusa. Esta transformación se dará, por un lado, con la ayuda del experto del sistema y, por el otro lado, con el razonamiento alternativo.
- Una vez teniendo esta traducción, el razonamiento aproximado de la lógica difusa hace su tarea, enlazando las variables propuestas a controlar, dando respuestas a condiciones del sistema.
- El identificar variables, darles su espacio difuso, y relacionarlas, son etapas producidas, como se menciona en párrafos anteriores, por el diseñador del sistema y la parte concedora del sistema a controlar (el experto).
- Las etapas anteriores son vaciadas al software Modico [M2], el cual registrará toda la información necesaria para generar respuestas concretas.

- Las respuestas desarrolladas por el software serán afinadas, de tal manera que su resultado sea lineal y carezca de cambios bruscos, eliminando cualquier condición inestable.
- Una vez que se tiene una respuesta lineal después de la afinación, se genera el código en lenguaje C con la ayuda del software Modico.
- El programa generado por Modico, tendrá que ser acondicionado para adaptarlo al simulador del reactor BWR de la central nucleoelectrónica Laguna Verde.

A continuación se presenta una breve descripción de los capítulos que conforman esta tesis.

En el capítulo 1, se da una descripción de los conceptos fundamentales relacionados con la lógica difusa: fundamento lógico, el álgebra de los conjuntos difusos y las partes que componen un sistema difuso, haciendo hincapié en los diferentes métodos que llevan un proceso difuso y una desdifuzificación, según las necesidades del diseñador.

Con respecto al sistema a controlar, el capítulo 2 define las bases de la fisión nuclear y la forma de medirla, al mismo tiempo que incursiona en una somera descripción de los reactores BWR's, conteniendo la formulación de los componentes principales del reactor que se encuentran en la Central Nucleoelectrónica de Laguna Verde.

En el capítulo 3, se hace mención de las respuestas de la potencia con relación a las barras de control y al flujo de recirculación, siendo éstos los métodos que alteran directamente la reactividad dentro del núcleo del reactor nuclear de agua en ebullición.

La definición del control difuso es abordado en el capítulo 4, donde se identifican las variables de control, la estructura del sistema de control, los conjuntos difusos de las variables, y se determinan los métodos del propio proceso difuso, basados en un software que recrea el razonamiento difuso.

En el capítulo 5, se integra el control difuso obtenido y el simulador del reactor nuclear de Laguna Verde en un sólo bloque, conformando la estructura del sistema de control, describiendo en una serie de pasos el comportamiento que tendrá dicho sistema.

Los resultados obtenidos después de implementar el sistema en conjunto son expuestos en el capítulo 6, en el cual se menciona las comparaciones que hay entre las nueve corridas que se realizaron para determinar el desempeño del producto final.

Finalmente, en el capítulo 7, se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de ver los resultados obtenidos del sistema en su conjunto, además de visualizar las limitaciones técnicas que se dieron en el proceso de construcción del sistema y terminando con los alcances futuros del proyecto de tesis.

Como se pretende explicar en el interior del presente trabajo, esta forma de control alternativo que se ha utilizado, ayuda y contribuye a ver de otra manera un proceso o fenómeno, ya que la observación del sistema no es simplemente analítica, sino la experiencia directa que no se puede describir con un modelo matemático, se logra rescatar de una manera más sencilla y clara, además que se amplía el rango de control buscando más variables a manipular, sin las engorrosas manipulaciones que producen los modelos matemáticos.

Capítulo 1

Lógica Difusa.

1.1. ¿Qué es la lógica difusa?.

La lógica difusa pertenece a un razonamiento aproximado de las cosas, una manera de percibir y redefinir la realidad de forma más cercana a ella. Es una teoría que ayuda a modelar el mundo de una forma más natural, me imagino como si fuera un traje de buzo puesto a la medida, apretujado al cuerpo. Se apega más, se funde mejor.

Para este nuevo espejo de lo real, la lógica difusa viene a rellenar los huecos que la lógica clásica no toma en cuenta - a partir de la época aristotélica se construyó la teoría de conjuntos que viene siendo un subconjunto de los conjuntos difusos y que es parte del legado occidental, mientras que la lógica difusa es un legado del oriente por parte de Buda -, las posibilidades de respuesta a una aseveración ya no acaban en los extremos, ya no son respuestas bivalentes, ya no cabe el: "es o no es", "cero o uno", "blanco o negro", ahora habrá más información que describa mejor el fenómeno en cuestión, que puede tener una infinidad de graduaciones desde "blanco y negro", hasta todos los matices de grises que puede haber.

Como ejemplo diré lo siguiente: si yo pregunto si mis zapatos son negros, ya no me responderán: sí son negros o no son negros; ahora la respuesta puede estar llena de matices, que estan delineando cuál es el color de mis zapatos y la respuesta en un enfoque de lógica difusa puede ser: muy negros, más o menos, no tan negros, casi negros, etc. Estas palabras ya dan una idea que está más apegada a la realidad. Respuestas que pertenecen a nuestro lenguaje cotidiano, a una forma de describir los fenómenos dándonos una idea más precisa de lo que es en realidad el color de los zapatos, (nos acercamos más a la realidad, "a mayor borrosidad mayor precisión", diría Kosko) [K1].

Si observamos el ejemplo anterior, podemos decir que el hombre relaciona los conceptos y razona con ellos, de cierta manera moldea su realidad en base a conceptos difusos.

Tomemos como ejemplo una idea, una palabra, digamos pantalón, la palabra pantalón nos describe un objeto que le llamamos así. Si pensáramos como la lógica clásica, mi única clasificación de este objeto es: es o no es, me muestran un objeto y yo decido si es un pantalón o no lo es, en este momento tengo dos extremos, tajantemente yo he dividido los objetos en si o no, cero o uno, blanco o negro. Si ahora me voy del lado de la lógica difusa diría lo siguiente:

Mi palabra es pantalón, la palabra pantalón genera conjuntos, estos conjuntos son difusos y cada uno de nosotros define sus propias delimitaciones de manera diferente y con diferentes ejemplos, es decir, los conjuntos que crea la palabra pantalón podría definirlos como: viejo, corto, holgado, mal hecho, chueco, etc.

Estos conjuntos que yo definí dependen de mi experiencia, o de un consejo de una persona experta, tal vez un modisto, o de sentido común. Entonces, si ahora me muestran un objeto yo le doy un grado de pertenencia por cada conjunto a ese objeto, en este momento tengo un número mucho mayor de posibles respuestas.

Tal vez sea un pantalón vaquero y yo le de un grado de pertenencia de 0.1 en el conjunto "holgado", un grado de 0.5 al conjunto "mal hecho" porque lo compré en la falluca, etc., pero ese objeto pertenece a todos los conjuntos que yo definí, pero en cierto grado. Las cosas pertenecen a los conjuntos en cierto grado como se dijo anteriormente, esto quiere decir, que también las cosas pertenecen a su contrario en cierto grado.

Después de dar los conjuntos difusos basados en una palabra, agrupamos las cosas en conjuntos difusos y jugamos con los grupos buscando conexiones entre ellos. Estamos relacionando conjuntos difusos y de esta manera estamos llegando a una decisión, estamos razonando. Esa relación se basa en el sentido común o en el consejo de un experto. Este grupo de relaciones genera un sistema difuso. Por lo consiguiente un sistema difuso va a razonar con conjuntos y números difusos. [K1]

La relación entre conjuntos se lleva a cabo mediante reglas difusas. Una regla difusa establece entre los conceptos difusos relaciones con forma de enunciados condicionados. Los sistemas difusos almacenan estas reglas de sentido común. Cada nuevo dato activa en cierto grado a todas ellas. Una regla difusa o heurística es una lógica de implicación de la forma:

Si <condición> entonces <consecuencia>

Al decir que las cosas pertenecen a los conjuntos en cierto grado estoy pensando en una línea del cero al uno (teniendo una representación unidimensional), donde no existe discontinuidad, esta línea describe los grados de pertenencia de la palabra a los conjuntos difusos.

1.2. Sistemas difusos.

Con lo anterior podemos concluir que efectivamente un sistema difuso se acerca más a la realidad y con esto poder llegar a una descripción más certera del fenómeno y así ser capaces de controlar de manera más efectiva. Otra ventaja que tenemos al respecto, es la simplicidad de llegar a un control de sistemas complejos, debido a la ausencia de modelos matemáticos en la construcción del sistema difuso, ya que como se dijo anteriormente, el sistema difuso es un grupo de relaciones entre conjuntos difusos, esta relación se puede llegar por consejo de un experto o por el método basado en la experiencia o por sentido común. Así el sistema difuso toma este conocimiento y hace de él un modelo del sistema a controlar.

Uno de los puntos importantes a ver en la teoría de los sistemas difusos y el cual nos ayuda ha comprender de mejor manera como un sistema difuso puede competir con un control clásico, es el llamado teorema de aproximación difusa, FAT (fuzzy approximation theorem). [M1] Nos dice que un sistema difuso puede formar modelos de, o aproximarse a, cualquier sistema.

El teorema dice que siempre se puede cubrir una curva con un número finito de parches difusos. Estos parches es el producto de conjuntos difusos de entrada contra los de salida.

Para seguir con el análisis de un sistema difuso, en la Figura 1, se muestra un esquema de lo que es un sistema de control difuso, para poder desglosar las partes que lo componen.

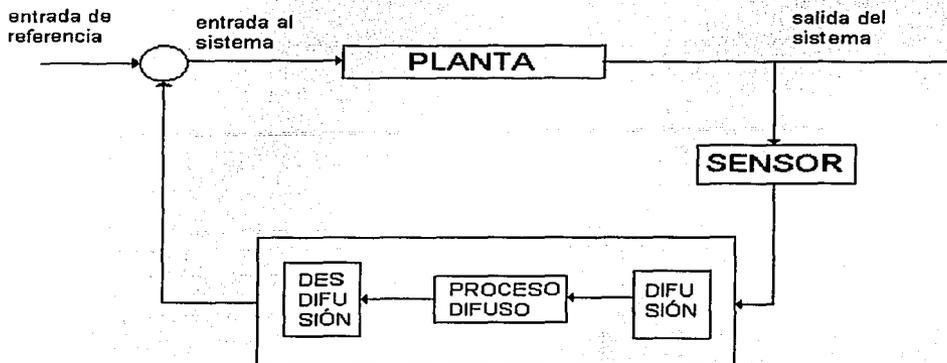


Figura 1. Diagrama de bloques que representa un sistema de control difuso en lazo cerrado.

En la figura anterior se muestra una representación gráfica de lo que es un sistema de control difuso. Se observan tres partes importantes que son: difusión, proceso difuso y desdifusión, y que en conjunto lleva el nombre de máquina de inferencia difusa.

Para seguir analizando de manera global la teoría de sistemas difusos se presenta a continuación la teoría de conjuntos difusos.

1.3. Conjuntos difusos.

Si bien esta sección no pretende analizar de manera detallada el estudio de la teoría de conjuntos difusos, si presentará una pequeña descripción que ayudará a entender mejor el proceder de un sistema de control difuso.

Los elementos de un conjunto difuso pertenecen a él en un cierto grado. Y no nada más los conjuntos son difusos sino también lo son los números.

A continuación se muestra una representación de un número difuso que se llame "casi cero".

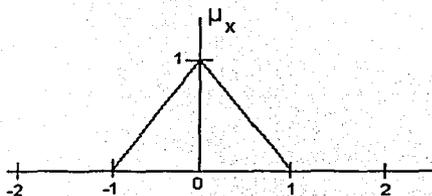


Figura 2. Representación de un número difuso "casi cero".

Véase que cada vez que nos acercamos al cero el grado de pertenencia tiende a ser uno, es decir, cuando se llega a cero, el número alcanza un valor de pertenencia uno, llegando a un valor extremo - un extremo de la lógica aristotélica - mientras que si nos alejamos más del cero, el grado de pertenencia tiende a cero, por lo que llegamos al otro valor extremo. Mientras que en los puntos que se encuentran en medio de las aristas la pertenencia o la función de membresía aumentó de manera gradual.

La representación de un conjunto difuso nos dice el grado de pertenencia que cada valor o dato tiene en el universo del discurso, es decir, en el rango de valores que se está analizando. A esto le llamamos función de membresía. [M1]

Una definición de un conjunto da lo siguiente: sea E un conjunto y sea x un elemento de E . Entonces un subconjunto A de E es un conjunto de pares ordenados $\mu_A(x)$:

$$\{[x, \mu_A(x)]\}, \text{ para todo } x \in E$$

donde $\mu_A(x)$ es el grado o membresía de x en A .

Si $\mu_A(x)$ toma sus valores en un conjunto M llamado conjunto de membresía, uno puede decir que x toma sus valores en M a través de la función $\mu_A(x)$:

$$\begin{array}{l} x \rightarrow M \\ \mu_A(x) \end{array}$$

Esta función es llamada función de membresía. Si $M = [0,1]$, el subconjunto A es entendido como un conjunto difuso y la función $\mu_A(x)$ será una función difusa. El conjunto E también se le puede llamar Universo del discurso, ya que este es el conjunto de todos los conjuntos difusos.

Una variable lingüística u en el universo del discurso, como se dijo anteriormente define conjuntos difusos, los conjuntos difusos vienen siendo sus valores lingüísticos de esa variable.

Por ejemplo, si u significa presión, entonces sus conjuntos $P(u)$ pueden ser:

$$P(u) = \{ \text{alta, mediana, baja} \}$$

Sobre el universo del discurso $U = [0 \text{ } 30]$. Así que *alta, mediana y baja* son valores lingüísticos de la variable lingüística presión.

Ligando entonces lo anterior, decimos que con una idea o palabra o en este caso con una variable lingüística podemos definir conjuntos difusos o valores lingüísticos y que cada dato recogido dentro del universo del discurso tiene un grado de pertenencia en cada uno de los valores lingüísticos.

Existen muchas formas de representar un conjunto difuso o como se menciona renglones atrás "función de membresía", pero los elementos que la conforman son los mismos. A continuación se muestra un conjunto difuso, al cuál se le ha sobrepuesto los nombres de las partes que lo conforma.

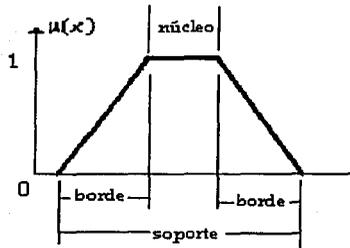


Figura 3. Partes de uma função de membresia.

Núcleo. Este elemento de la función de membresia da una región donde el grado de pertenencia es total, es decir:

$$N = \{ x / \mu_A(x) = 1 \}$$

Soporte. Esta región enmarca todos los elementos que tienen un grado de pertenencia mayor a cero, es decir:

$$S = \{ x / 0 < \mu_A(x) \leq 1 \}$$

Bordes. En esta parte de la función de membresia se tienen los elementos con grado de pertenencia menor a la total, pero no dejan de tener un cierto grado mayor a cero, esto es:

$$B = \{ x / 0 < \mu_A(x) < 1 \}$$

Las formas de estos conjuntos son convexas, esto indica que los valores de las funciones se incrementan o decrecen monótonicamente, pero una vez que decrecen no pueden incrementarse otra vez.

1.3.1. Conjunto de operaciones difusas.

Dado E el universo del discurso, $x \in E$ y los subconjuntos difusos $A \subset E$ y $B \subset E$.

La operación unión $A \cup B$ es un subconjunto difuso que pertenece a E definido por:

$$\begin{aligned} \mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \\ \Rightarrow \mu_{A \cup B}(x) &= \max [\mu_A(x), \mu_B(x)] \end{aligned}$$

La operación intersección $A \cap B$ es un subconjunto difuso que pertenece a E definido por:

$$\begin{aligned} \mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \\ \Rightarrow \mu_{A \cap B}(x) &= \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] \end{aligned}$$

La operación complemento del conjunto difuso A que pertenece a E está definido por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

1.3.2. Principales propiedades de los conjuntos difusos.

Estas propiedades en cierta manera contribuyen a la lógica difusa a un paso más allá que lo ocurrido con la lógica clásica.

Ley del medio excluido para conjuntos difusos.

Asumiendo que el conjunto difuso A es un subconjunto del universo del discurso E .

$$i) \quad A \cap \bar{A} \neq \emptyset$$

$$ii) \quad A \cup \bar{A} \neq E$$

Aquí se muestra que en realidad existe un solapamiento entre conjuntos, una vez más nos referiremos a lo dicho en paginas anteriores:

Las cosas pertenecen a ellas en cierto grado. Esto quiere decir que las cosas pertenecen a su contrario en cierto grado.

1.4. Sistema de control difuso.

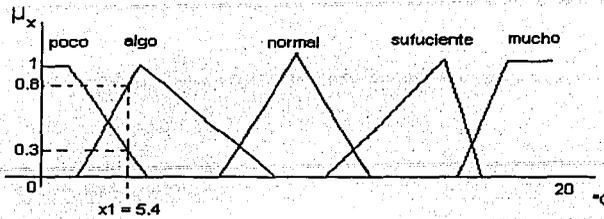
En esta sección se trata de dar una panorámica sobre las partes que componen un sistema de control difuso, como se mencionó en la sección 1.2. *Sistemas difusos*, un sistema de este tipo se integra por tres partes: difusión, proceso difuso y desdifusión. A continuación se presenta la información para entender los conceptos antes mencionados.

1.4.1. Difusión.

Una vez identificado los conjuntos difusos, comenzaré a hablar de la primera parte de la máquina de razonamiento llamada *difusión o difuzificación*.

En esta parte realizamos la transformación de los valores *crisp*, valores que nos dan el comportamiento del sistema como variables de entrada a valores difusos. Estas son trasladadas al mundo difuso dándoles un grado de pertenencia del $[0,1]$ para cada función de membresía, todos los conjuntos difusos se activan en cierto grado (ver figura 4). La mayor parte en grado nulo. [S1]

Cada valor lingüístico tiene un valor difuso con respecto al valor *crisp*.



$x_1 = 5.4^{\circ}\text{C}$ como valor crisp
tiene ahora sus valores difusos con respecto a la función de membresía μ_x

x_1 en el mundo difuso corresponde a:

poco	= 0.3	
algo	= 0.8	
normal	= 0.0	grados de pertenencia
suficiente	= 0.0	
mucho	= 0.0	

Figura 4. Proceso de difuzificación.

Después de esta acción entrará al proceso difuso.

1.4.2. Proceso Difuso.

Esta etapa está dividida en dos partes, la base de conocimiento y la lógica de decisión.

Base de Conocimientos. Esta parte lleva el modelo del sistema a controlar. Aquí se encuentran las funciones de membresía y la estructura difusa. Con la estructura de las reglas difusas se muestra el alcance del control y su estrategia del propio sistema.

Lógica de decisión. Aquí se da la inferencia, usando la lógica de implicación difusa para poder simular la decisión humana. Es decir, en esta etapa se relacionan las variables lingüísticas, se juega con ellas generando acciones basadas en reglas.

Decimos entonces que la lógica difusa significa razonamiento con números difusos y conjuntos difusos. Pero este razonamiento se lleva a cabo por un aspecto del pensamiento humano, la lógica de implicación, la cual consiste en una formulación de conexión entre causa y efecto, es decir, de condición y consecuencia. [K1]

Aquí está el cerebro difuso, cada valor *crisp* que fue difuzificado, activa todas las reglas en cierto grado, cada regla toma una acción que en su conjunto genera una función de membresía de salida.

Hay muchas formas de implicación difusa para obtener la relación de conjuntos difusos. A continuación se muestran las dos reglas de implicación

difusa más importantes que se usan normalmente por su fácil manipulación computacional. [11]

Regla e Implicación Difusa	Implicación	Implicación Difusa $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$
Operador mín [Mamdani]	$a \rightarrow b = a \wedge b$	$= \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)$
Operador product [Larsen]	$a \rightarrow b = a \cdot b$	$= \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$

La primera implicación difusa mín de Mamdani se obtiene si el operador intersección es usado en la conjunción difusa. Para la implicación difusa product de Larsen se obtiene si el producto algebraico es usado en la conjunción difusa.

Cuando cada regla ha obtenido su propia función de membresía y sabemos que todas las reglas son activadas, el resultado obtenido es una serie de funciones de membresía. Para obtener una sola salida se utiliza la agregación que no es más que la combinación de las salidas difusas de cada regla.

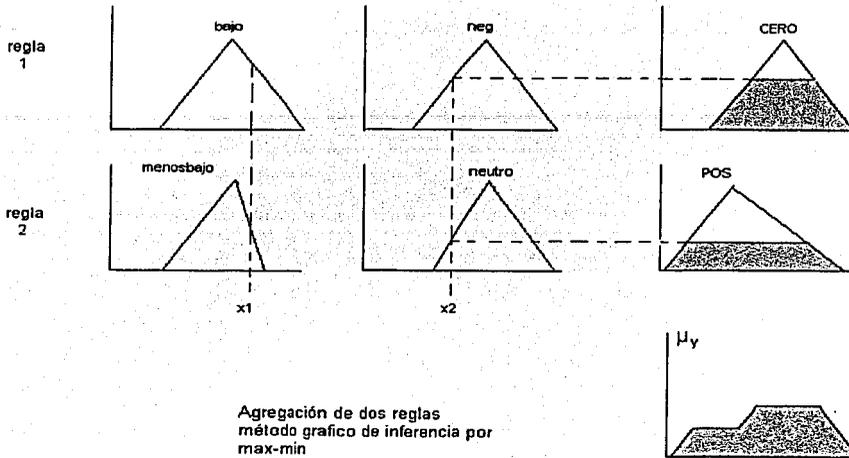
Si estamos utilizando el método o razonamiento difuso de implicación difusa mínimo de Mamdani, se observará que cada regla será resultado de utilizar el operador mín en la relación que guardan los conjuntos difusos de entrada y la agregación de conjuntos difusos de salida se dará por medio del operador max, como se observa en la figura 5.

Si ahora estamos trabajando con el razonamiento difuso de implicación difusa product de Larsen, la relación de los conjuntos difusos de entrada se obtiene por el operador producto y la agregación en los conjuntos de salida será igual al método anterior.

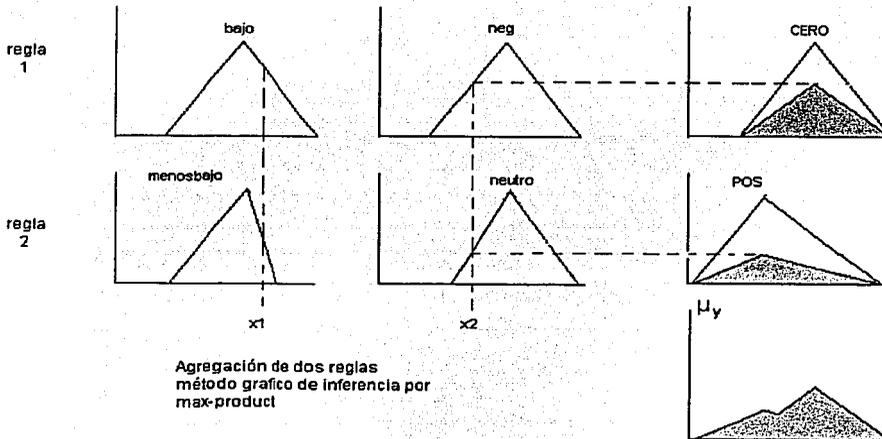
Los métodos anteriores, mínimo de Mamdani y producto de Larsen son llamados estructuras de control difuso utilizadas común y frecuentemente debido a su simplicidad y eficiencia computacional.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

regla 1 IF $x_1 = \text{bajo}$ AND $x_2 = \text{neg}$ THEN out = CERO
 regla 2 IF $x_1 = \text{menosbajo}$ AND $x_2 = \text{neutro}$ THEN out = POS



Agregación de dos reglas
 método gráfico de inferencia por
 max-min



Agregación de dos reglas
 método gráfico de inferencia por
 max-product

Figura 5. Agregación en un sistema.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

1.4.3. Desdifusión.

El conjunto difuso de salida es sometido al proceso de *desdifusión* o *desdifuzificación* en el cual se obtiene un solo valor del universo del discurso representando al conjunto final y que será el valor de salida del control.

La desdifuzificación se puede realizar por diferentes métodos dependiendo de la disponibilidad del controlador. El objetivo es derivar un valor *crisp* que mejor represente el conjunto difuso inferido, esto estriba en una transformación inversa la cual retraslada la salida del dominio difuso al dominio *crisp*.

Los métodos son variados, y entre los cuales figuran los siguientes:[M1]

- centroide,
- centro de sumas,
- máxima membresía,

A continuación se muestra una representación gráfica sobre los tres métodos de desdifuzificación seleccionados.

El método del **centroide** se basa en encontrar el peso promedio de la función de membresía, es decir, se encuentra el centro de gravedad del área que comprende dicha función resultado de la inferencia (ver figura 6).

La expresión que nos ayuda a encontrar el centroide es la siguiente:

$$y = \frac{\int [\mu_x(x) \cdot x] dx}{\int \mu_x(x) dx}$$

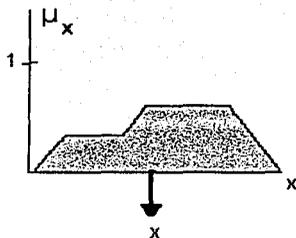


Figura 6. Método del centroide

El método **centro de sumas** es una técnica de desfuzificación que sólo es válida para los casos donde la función de membresía de salida es resultado de una agregación de funciones simétricas.

En este método se obtienen los puntos centrales de cada función convexa que forma la función de membresía de salida y se obtiene el centro de gravedad de esos puntos (ver figura 7).

La expresión que define esta técnica es la siguiente:

$$\mu_x(x) = \max[\mu_{x1}(x), \mu_{x2}(x), \mu_{x3}(x), \dots, \mu_{xr}(x)]$$

$$\mu_{x^k}(x^k) = \max[\mu_{x^k}(x)]$$

$$x = \frac{\sum_{k=1}^{k=r} \mu_{x^k}(x^k) \cdot x^k}{\sum_{k=1}^{k=r} \mu_{x^k}(x^k)}$$

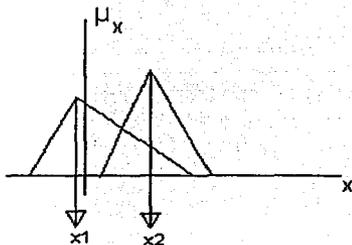


Figura 7. Método de centro de sumas.

El método de **máxima membresía** consiste en tomar de la función de membresía de salida el valor que contenga el grado de pertenencia máximo de toda la función, a este valor se le da la mejor representatividad del conjunto difuso de salida (ver figura 8).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La expresión que determina el valor *crisp* buscado, es la siguiente:

$$\text{Max}_{x \in X} [\mu_x(x)] = \mu_x(x)$$

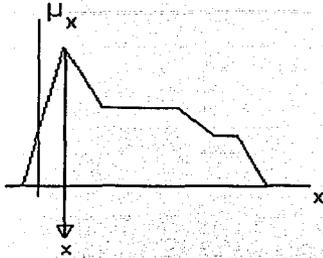


Figura 8. Método de máxima membresía.

De esta manera, el valor obtenido por cualquiera de estos métodos tiene características del dominio de números *crisp*, regresando al sistema como valor traducido por la desfuzificación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 2

FISIÓN NUCLEAR

2.1. Reacción Nuclear.

2.1.1. Energía en la Fisión Nuclear.

Toda la materia del Universo está formada por moléculas que a su vez están constituidas por átomos, las cuáles están formadas fundamentalmente por un núcleo compuesto de protones y neutrones y por electrones que giran alrededor de éste.

El número de protones que contiene el núcleo de un átomo se le denomina número atómico y es igual al número de electrones orbitales.

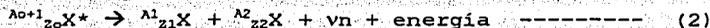
Dentro del reactor nuclear se lleva a cabo un proceso físico capaz de obtener energía, esta energía es resultado de un choque entre un neutrón y un núcleo de número atómico grande, dicho núcleo es dividido o fisionado, generalmente en dos fragmentos [12].

Los productos de la reacción son producidos con una gran cantidad de energía cinética la cual es posteriormente convertida a calor, siendo esta energía calorífica la que se utiliza para producir vapor y consecuentemente energía eléctrica en una planta nuclear.

Las dos partes en las que un núcleo es dividido en una reacción de fisión, reciben el nombre de productos de fisión. Este proceso consta de dos etapas, en la primera un isótopo pesado X de masa A_0 y número atómico Z_0 absorbe un neutrón n



formando un núcleo excitado X^* . En la segunda etapa, el núcleo excitado puede dividirse en dos isótopos (fragmentos de fisión) altamente radiactivos, liberando energía del orden de 200 mega-electrón-voltios (MeV) y emitiendo en promedio de 2 a 3 neutrones adicionales por fisión:



Donde:

$$A_0 = (\nu - 1) + (A_1 + A_2)$$

$$Z_0 = Z_1 + Z_2$$

Los neutrones adicionales emitidos fisionarán otros núcleos del mismo isótopo, en lo que se denomina una "reacción en cadena". El control de la reacción en cadena se obtiene mediante la absorción de neutrones por elementos como el boro o el cadmio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La Figura 9 representa la reacción en cadena dentro del reactor.

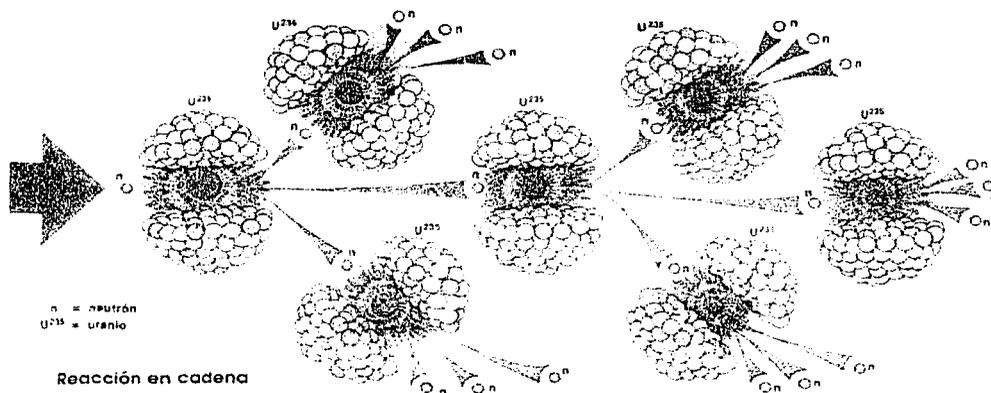


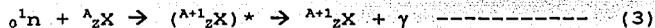
Figura 9. Reacción en Cadena.

Dentro del reactor nuclear, no sólo existe la fisión nuclear, sino que también los neutrones pueden tener otros eventos:

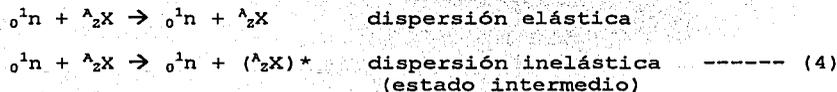
- Captura radiactiva y
- dispersión.

Para la captura el neutrón incidente es primeramente absorbido por el núcleo pesado para formar un núcleo compuesto de masa A+1 y a medida que el tiempo pasa, este decaerá a su estado estable mediante la emisión de un fotón altamente energético, que es el rayo gamma.

Para comprender este proceso a continuación se expone la ecuación de captura radiactiva.



Con respecto a la dispersión el neutrón simplemente cambia de dirección y energía, no obstante en algunos casos, primero se puede combinar con el núcleo para formar un núcleo compuesto por un periodo corto de tiempo antes de ser re-emitido y frecuentemente abandona el núcleo. El núcleo compuesto queda en estado excitado, el cual posteriormente decae mediante la emisión de rayos gamma.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Los isótopos en los cuales la fisión tiene lugar con neutrones de baja energía se llaman físiiles, ellos son: U^{233} , U^{235} , Pu^{239} y Pu^{241} .

2.1.2. Factor de multiplicación de neutrones k.

Como se explicó en el apartado pasado, hay una producción de neutrones relacionada con la reacción en cadena, así que la condición requerida para una reacción en cadena estable y autosostenida en un reactor nuclear es que un neutrón deba ser producido por fisión, éste debe lograr inducir a su vez otra fisión. Es decir, una fisión debe producir otra fisión y con esto el número de fisiones que ocurran por unidad de tiempo a través del sistema debe ser constante.

Para tener una forma de medir la reactividad nuclear dentro del reactor y poder acceder a un control de la reacción en cadena, se utiliza el factor de multiplicación de los neutrones k, que no es más que la razón de neutrones que se producen entre los que se consumen.

$$k = \frac{\text{número de neutrones que se producen}}{\text{número de neutrones que se consumen}}$$

para lograr un funcionamiento estable del reactor, el valor de k debe ser de 1, así aseguramos que el mismo número de neutrones que se producen en las fisiones del combustible es el mismo número que se consume en el reactor, pero si el valor de k se encuentra en valores abajo o arriba del 1 se le llama k subcrítica o k supercrítica respectivamente.

Esto es:

k < 1; subcrítica
k = 1; crítica
k > 1; supercrítica

Cuando k es subcrítica no hay suficientes neutrones para mantener la reacción en cadena, por lo que la reactividad se verá mitigada, por la deficiencia de neutrones y la potencia disminuirá [C3].

Por el otro lado, si k es supercrítica habrá más neutrones producidos de los que se consumen para mantener la reacción en cadena, por lo que la potencia aumentará.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2. REACTORES NUCLEARES BWR's

El reactor de agua hirviente es un sistema nuclear generador de vapor consistente en [C2]:

- núcleo,
- separador de vapor,
- secador de vapor y
- bombas de tobera.

principales componentes del reactor en cuestión. Los cuatro elementos están contenidos dentro de la vasija del reactor. Esta vasija es de acero de baja aleación con un espesor de 14 centímetros y recubierta internamente con acero inoxidable.

En el exterior de la vasija pero formando parte del reactor nuclear se encuentran los mecanismos impulsores de las barras de control, las tuberías y bombas de recirculación.

En la figura 10 que se muestra al final del presente capítulo se muestra un diagrama del reactor con las principales conexiones a la vasija, las cuales son las siguientes [C2], [H1], [I2]:

- tuberías que llevan el vapor a la turbina
- tuberías de recirculación
- inserciones de los mecanismos impulsores de las barras de control
- tuberías de alimentación de agua del condensador.

Hay más conexiones a la vasija pero el presente trabajo no quiere abundar en detalles, sino dar una panorámica del funcionamiento del reactor BWR.

2.2.1. La vasija.

Para que el reactor nuclear funcione como generador de vapor necesita de tres elementos esenciales: **combustible, moderador y fluido refrigerante**, los tres elementos contenidos también dentro de la vasija del reactor.

El **combustible nuclear** es uranio y que a partir de la fisión nuclear del uranio se obtiene calor sin que se produzca combustión, pero se le da el nombre de combustible por analogía a las plantas térmicas convencionales.

El uranio se utiliza en forma natural que contienen 0.7% de uranio 235, o bien en forma de uranio enriquecido al que artificialmente se le eleva la concentración de uranio 235 hasta 3 o 4%.

En los reactores BWR's se utiliza uranio enriquecido en forma de óxido de uranio (UO_2), con el que se fabrican pequeñas pastillas cilíndricas de poco más de un centímetro de diámetro y longitud.

Para contener en el combustible los productos formados en la fisión, el combustible nuclear en forma de pastillas se encapsula en un tubo hermético.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El **moderador** hace posible la fisión, ya que para que exista el choque de un neutrón con un núcleo de uranio 235, y así se produzca una fisión, es necesario que la velocidad del neutrón sea aproximadamente 2 km/s, pero cuando el neutrón sale de un núcleo fisionado lleva una velocidad de 20,000 km/s y debe ser frenado. Esto se logra intercalando alguna sustancia cuyos átomos se encarguen de frenar a los neutrones, por medio de choques, provocando que estos últimos pierdan velocidad y se promueva la fisión nuclear.

Para este cometido, el moderador debe tener un peso atómico ligero, no debe absorber neutrones y debe tener una elevada densidad atómica. Los moderadores más usados son el grafito, el agua ordinaria (o agua ligera), el agua pesada y algunos líquidos orgánicos. Como por ejemplo, la planta nucleoelectrónica de Laguna Verde usa como moderador agua ligera.

Las sustancias que sirven de moderadores absorben distintas cantidades de neutrones; por ejemplo, el agua ligera absorbe más neutrones que el agua pesada y, para compensar el efecto que esta disminución de neutrones tiene sobre el número de fisiones, se debe aumentar el número de átomos de uranio 235, enriqueciendo el combustible.

Por último tenemos el **fluido refrigerante**, y su función es evacuar el calor producido por el combustible, para producir vapor. La gran cantidad de calor que se genera en el reactor a consecuencia de la reacción nuclear, debe ser extraída para producir el vapor que se requiere en la generación de energía eléctrica y, al mismo tiempo, mantener lo suficientemente baja la temperatura de los distintos elementos que se encuentran en su interior para que éstos no sufran ningún deterioro. Este fluido circula entre las barras de combustible impulsado por bombas, y no debe absorber neutrones ni ser corrosivo para los tubos y demás elementos del reactor. Los fluidos refrigerantes utilizados en los reactores que usan uranio enriquecido son el agua ordinaria y el anhídrido carbónico.

Para los reactores BWR el vapor se produce directamente en el reactor, por lo que el moderador y el fluido refrigerante es el mismo, siendo el agua ordinaria en el caso de la planta nucleoelectrónica Laguna Verde.

2.2.2. El sistema de seguridad.

En cualquier sistema no puede faltar el **sistema de seguridad** y las plantas nucleoelectrónicas tienen una serie de dispositivos de seguridad destinados a mantener bajo control la reacción de fisión en cadena y evitar la salida de radiación al exterior en caso de accidente.

Los dispositivos son los enunciados a continuación [C3]:

- barras de control,
- sistemas de refrigeración de emergencia y
- estructuras de contención.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las barras de control están constituidas de un material que absorbe neutrones (carburo de boro), de esta manera al introducirse entre las barras de combustible capturan neutrones y da como resultado una disminución en las fisiones en el combustible [H1].

Las barras de control cruciformes contienen 84 tubos de acero inoxidable (21 tubos en cada ala de la cruz) llenas con polvo de carburo de boro compactado. Las barras de control se pueden poner en posición en pasos de 6 pulgadas y tienen una velocidad nominal de retiro e inserción de 3 pulgadas/segundo.

La figura número 11, muestra la estructura de las barras de control, la figura mencionada se presenta al final de este capítulo.

Las barras de control realizan la doble función de dar forma a la distribución de la potencia y controlar la reactividad. La distribución de la potencia en el núcleo es controlada durante la operación del reactor manipulando patrones pre-establecidos de las barras.

El sistema de refrigeración de emergencia entra cuando se detecta la falta de refrigerante del combustible que es normalmente el fluido refrigerante. Las bombas de recirculación son activadas también para controlar la potencia del reactor.

Las bombas jet o de chorro están ubicadas en la región anular entre la envolvente del núcleo y la pared interior del recipiente. El sistema de recirculación incluye de 16 a 24 bombas, dependiendo del tamaño del sistema del reactor nuclear. Cada ensamble de bomba de chorro está compuesto de dos bombas jet y no contienen ninguna parte que se mueva.

En la figura 12 se muestra el arreglo de la vasija del reactor para el sistema de recirculación.

Las estructura de contención son estructuras que aíslan al material radiactivo del ambiente exterior, siendo estos los siguientes:

- la pastilla de combustible,
- los tubos que encapsulan las pastillas de combustible,
- la vasija del reactor,
- el edificio de contención primario: edificio que rodea la vasija del reactor y el circuito de refrigeración, construido de concreto armado con acero. Con paredes de 1.5 metros de espesor y por dentro se recubre con chapa de acero de 0.95 centímetros y
- el edificio de contención secundaria que rodea la contención primaria y a todos los equipos relacionados con la operación del reactor y cuenta con un sistema de aire acondicionado que mantiene una presión negativa en su interior e impide la salida del material a la atmósfera.

Durante la operación normal de la planta varios sistemas respaldan al reactor nuclear pero sólo se nombran los indispensables para mejor

entendimiento de la planta nucleoelectrica. La figura número 13 muestra la contención primaria y secundaria del reactor en la planta nucleoelectrica Laguna Verde.

Regresando a los principales componentes de un reactor nuclear y a la aclaración del funcionamiento integral del reactor se da una explicación de las partes mencionadas al principio de este capítulo.

2.2.3. El núcleo.

Siendo el núcleo la fuente de calor nuclear, en el caso de la Central Laguna Verde éste consiste en 444 ensamblajes de combustible enfriados por el sistema de agua de recirculación. Cada ensamble contendrá diferentes enriquecimientos en las barras. Por ejemplo en la Central Nucleoelectrica Laguna Verde se usan cuatro enriquecimientos de uranio 235 en los ensamblajes para reducir los picos de potencia local [C1].

En la Figura 14 se muestra un corte transversal del núcleo del reactor de Laguna Verde, observándose la distribución de las barras de control y los tres tipos de ensamble de combustible de la carga inicial.

Posteriormente en los siguientes ciclos de operación, se recarga aproximadamente una cuarta parte de los ensamblajes totales del reactor. Por ejemplo en Laguna Verde la unidad 1 en el ciclo 2 se recargaron 96 ensamblajes al 2.72% de uranio 235, para remplazar aquellos cuyo enriquecimiento ha disminuido por las fisiones del uranio 235.

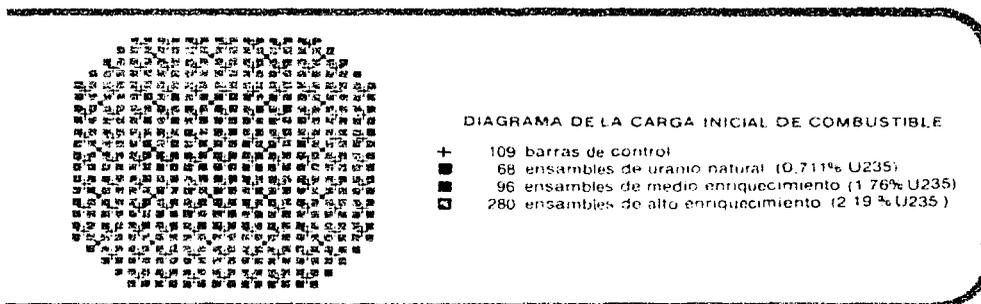


Figura 14. Diagrama de la carga inicial de combustible.

Como se puede ver, el núcleo del BWR lo comprenden sólo dos componentes: ensamblajes de combustible y barras de control.

En el núcleo inicial, cada elemento combustible contiene 62 barras de combustible que están espaciadas y soportadas en un arreglo cuadrado 8x8. En la Figura 15 mostrada al final del capítulo, se presenta el elemento combustible, para visualizar con mejor óptica lo anterior.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para comprender mejor el funcionamiento del reactor a continuación se explica el funcionamiento de los cuatro elementos principales del reactor en conjunto.

2.2.4. Sistema de recirculación.

El sistema de recirculación se divide en dos circuitos externos a la vasija del reactor. Las bombas jet o bombas de chorro ubicadas dentro del recipiente del reactor se usan en el sistema de recirculación del BWR, proporcionando una trayectoria de circulación interna continua para una importante porción del flujo del enfriador del núcleo. Véase la Figura 16.

Las bombas jet de chorro pertenecen al sistema de recirculación del agua del reactor es un sistema fijo y su función es circular el refrigerante necesario a través del núcleo del reactor.

SISTEMA DE RECIRCULACION DE BOMBA DE CHORRO

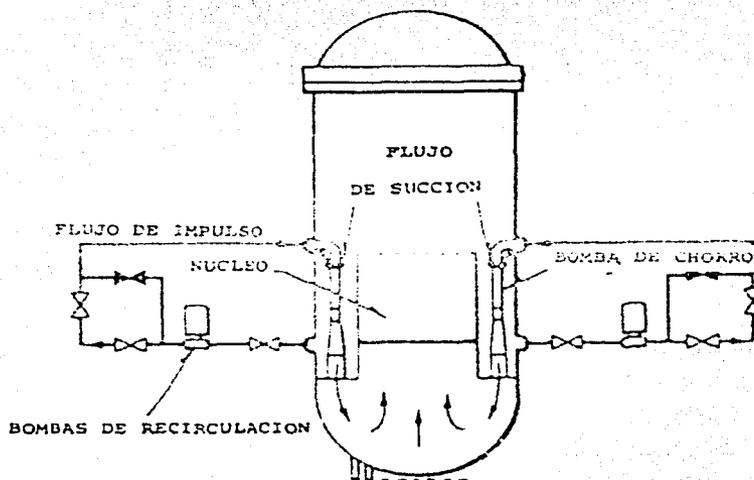


Figura 16. Sistema de recirculación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.5. Separador y secador de vapor.

El agua refrigerante pasa a lo largo de las barras de combustible en donde se calienta y se convierte en una mezcla bifásica de vapor-agua. La mezcla de vapor-agua entra al plenum ubicado directamente encima del núcleo y unida por el domo separador, el cual se abre al conjunto de separadores de vapor fijos. El vapor es separado del agua y pasa a través del secador de vapor en donde cualquier agua remanente es removida. El vapor saturado sale del recipiente a través de las boquillas de la línea de vapor ubicada cerca de la parte superior de la vasija y es enviado por tubería a la turbina [H1]. En la Figura 17 se presenta la ubicación del separador y secador de vapor en el interior del reactor nuclear.

El agua recolectada en la charola de soporte del secador es dirigida a través de líneas de drenaje, se une con el agua que sale de los separadores y fluye hacia abajo en el espacio anular entre la envolvente del núcleo y la pared de la vasija.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

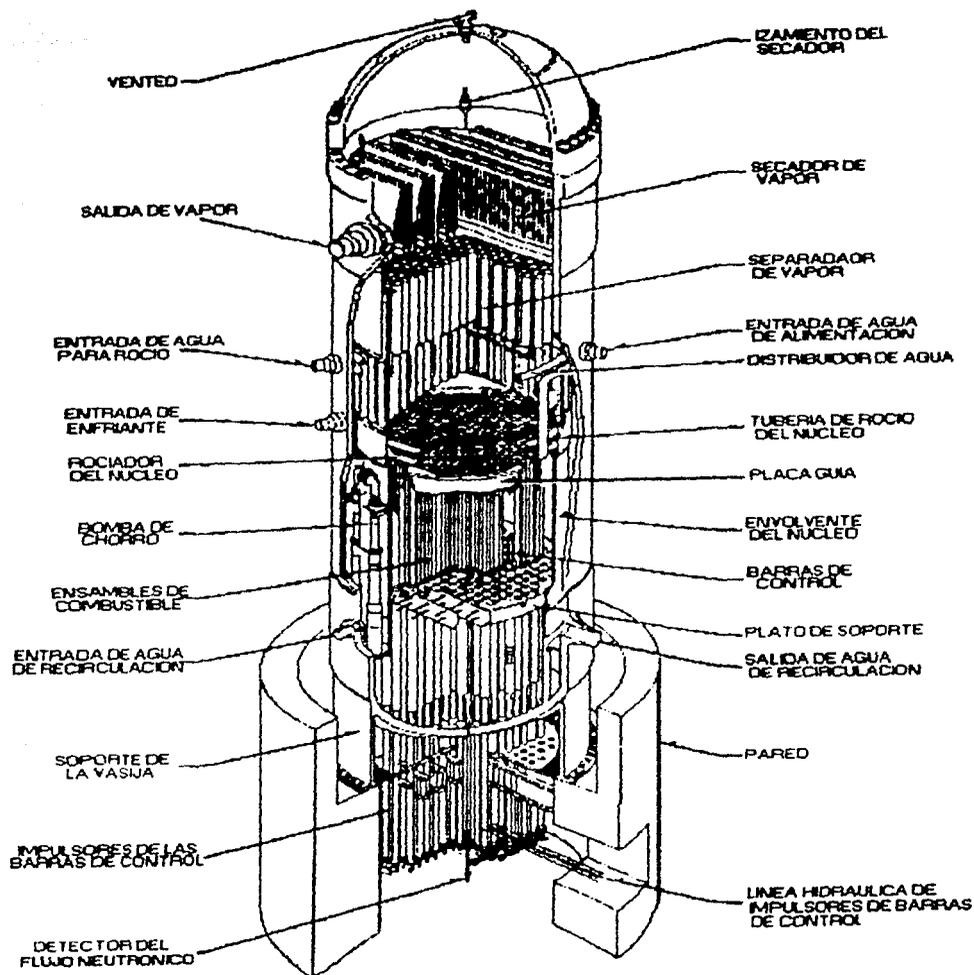


Fig. 10. Diagrama de un reactor nuclear BWR.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

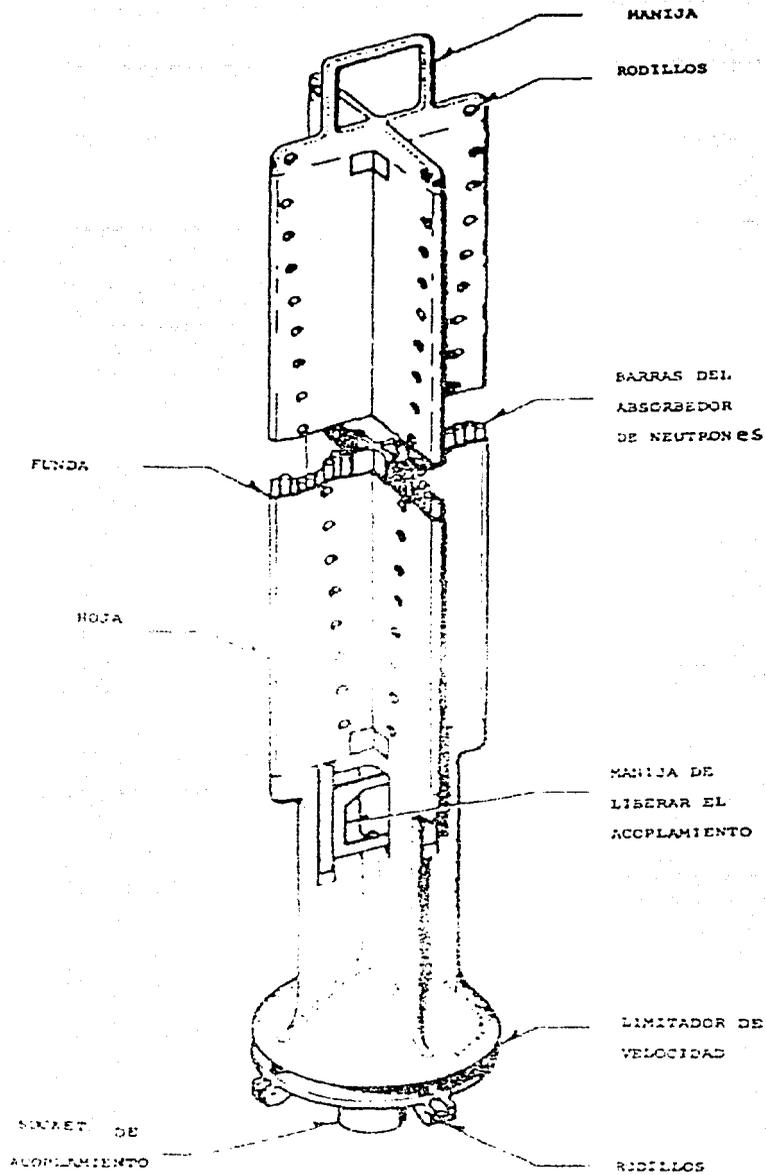


Fig. 11. Estructura de una barra de control.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

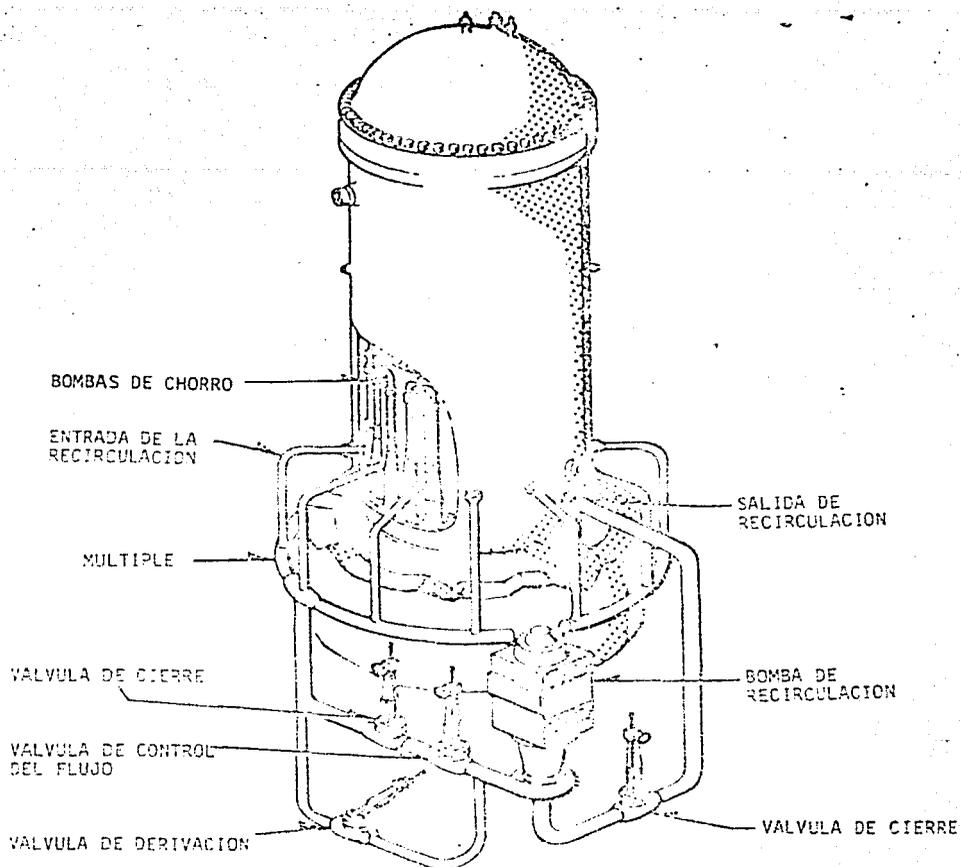


Fig. 12. Arreglo de la vasija del reactor BWR para el sistema de recirculación de la bomba de chorro.

Barreras de seguridad para la Central Nucleo-eléctrica de Laguna Verde

Contenedor secundario
Edificio del reactor
(Concreto armado de 1.2 a 1.5 m de espesor, provisto de un sistema de control atmosférico que impide que salgan los productos radiactivos)

Núcleo del reactor
(Material radiactivo)

Vasija del reactor
(Acero forjado de 15 a 20 cm de espesor)

Contenedor primario
(Concreto armado de mínimo 1.5 m de espesor, forrado internamente con una placa de acero de 1.5 cm)

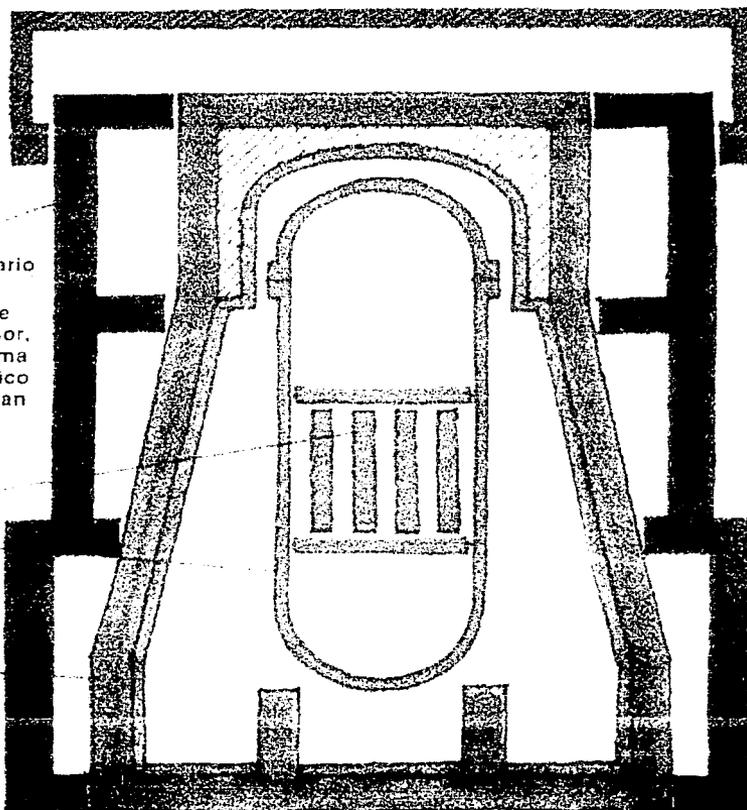
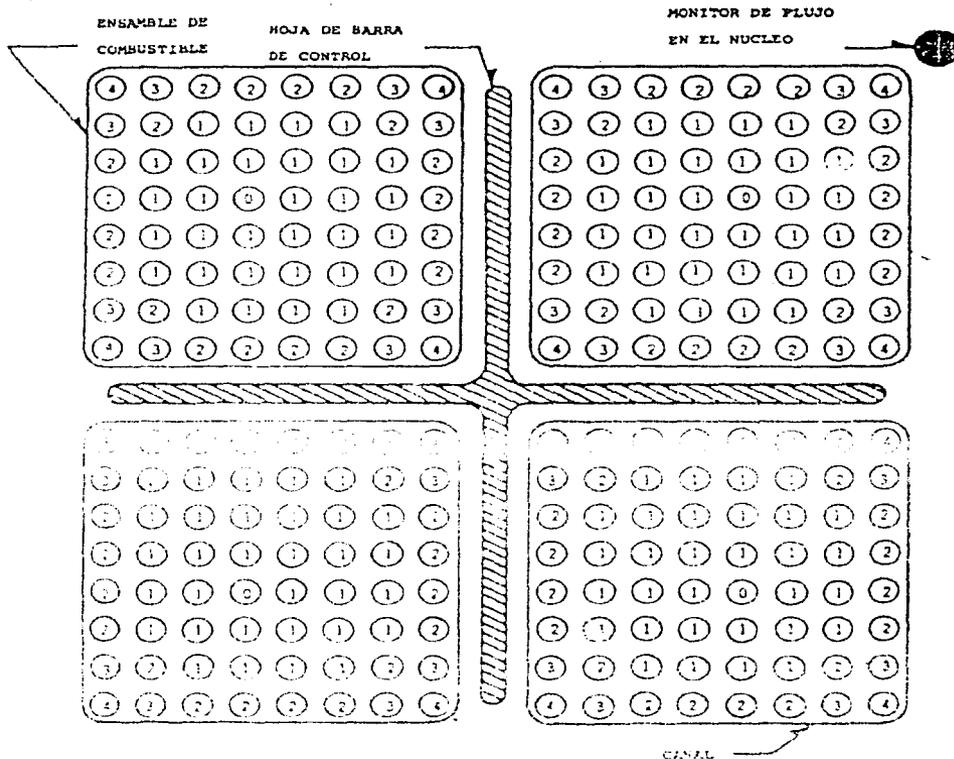


Fig. 13. Barreras de contención de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



NOTA: 1, 2, 3, y 4 INDICAN LA UBICACION DE CUATRO DIFERENTES ENRIQUECIMIENTOS DE BARRAS EN EL ENSAMBLE DE COMBUSTIBLE. 0 INDICA UNA BARRA DE AGUA.

Fig. 15. Elemento combustible.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

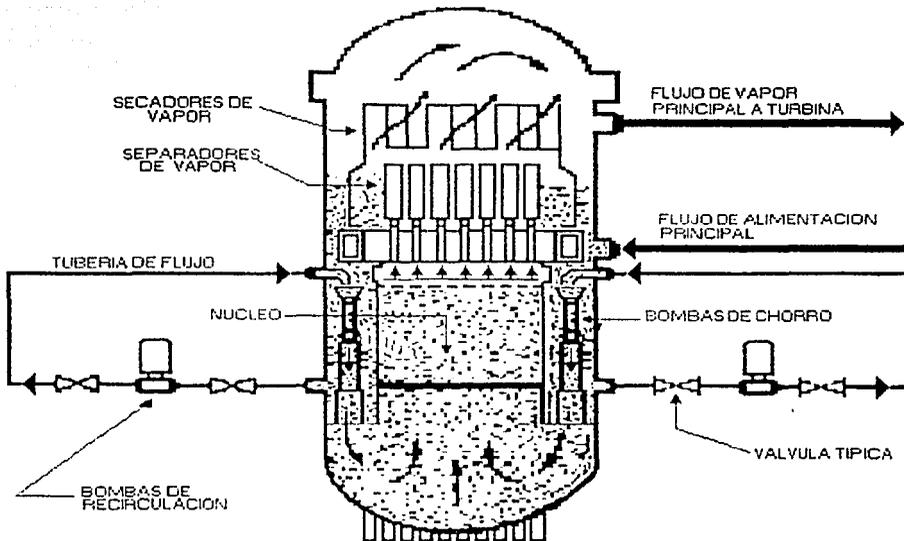


Fig. 17. Ubicación del separador y secador de vapor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 3

RESPUESTA DE LA POTENCIA EN EL NÚCLEO.

3.1. Potencia en el núcleo.

El nivel de potencia se mantiene o se ajusta por la posición de las barras de control hacia arriba y hacia abajo dentro del núcleo. El nivel de potencia del núcleo del BWR es ajustable además cambiando la tasa de flujo del refrigerante a través del núcleo sin cambiar la posición de las barras de control. Este flujo se controla con las bombas de recirculación.

Las barras de control están constituidas de un material que absorbe neutrones (carburo de boro), de esta manera al introducirse entre las barras de combustible -por la parte inferior del núcleo- capturan neutrones y da como resultado una disminución en las fisiones en el combustible. Con esto podemos decir que las barras de control realizan la función de dar forma a la distribución de la potencia y controlar la reactividad, considerando la manipulación del factor de multiplicación de neutrones, k . La distribución de la potencia en el núcleo es controlada durante la operación del reactor seleccionando patrones pre-establecidos de las barras [H1].

Con respecto a las bombas de recirculación, se dijo que tienen como función circular el refrigerante necesario a través del núcleo del reactor.

Así esto se traduce en lo siguiente: si sabemos que las bombas de recirculación hacen circular el refrigerante, que en este caso es el mismo moderador, entonces al controlar la cantidad de moderador dentro del núcleo del reactor, lo que estamos haciendo es manipular de cierta manera la capacidad de producir una reacción de fisión en cadena.

Concluyendo, el nivel de potencia y en especial la reactividad se mantiene o se ajusta por la posición de las barras de control hacia arriba y hacia abajo dentro del núcleo. El nivel de potencia del núcleo del BWR es ajustable además cambiando la tasa de flujo del refrigerante a través del núcleo sin cambiar la posición de las barras de control. Este flujo se controla con las bombas de recirculación montadas dentro de la vasija.

El control de la reactividad en el encendido, apagado y maniobras en núcleos de reactores BWR's está acompañado por la entrada y salida de las barras de control y el cambio del flujo del refrigerante/moderador.

3.2. Barras de control.

Las barras de control representan el principal mecanismo para controlar el reactor nuclear y son usadas para estabilizar el nivel de potencia.

Los movimientos de las barras de control están definidas por muescas, dando como resultado movimientos graduados para cambios pequeños

de potencia. Por lo tanto los cambios del nivel de potencia son rápidos y flexibles en respuesta a la demanda de la carga.

Adicionalmente el mover las barras de control perturbará la distribución de la potencia local, así al controlar el nivel de potencia del reactor nuclear, sólo a través del movimiento de las barras de control, puede resultar en indeseables picos de potencia.

Ya que el balance de reactividad gobierna las propiedades del núcleo, la respuesta al retirar las barras de control no es única. Esto depende del diseño de las barras de control, nivel de potencia, y distribución de los vacíos.

Al retirar las barras de control, el incremento de las reacciones de fisión en cadena tienden a aumentar, resultando que la reactividad incremente la ebullición del agua en la vecindad donde fue removida la barra de control. La ebullición genera burbujas creando vacíos que se incrementan y que se posicionan en la parte superior del núcleo. Entonces la tendencia de la potencia es decreciente en la parte superior del núcleo como un resultado del aumento de los vacíos en el refrigerante/moderador.

Así la respuesta del núcleo a las barras de control es dependiente de las condiciones de reactividad alrededor de la barra de control retirada y del tramo del combustible que se encuentra descubierto por la barra retirada y que es susceptible de producir reacciones de fisión en cadena.

Para un mejor estudio de las barras de control se dividen en tres partes [GE1].

- barras someras o de forma,
- barras profundas o de potencia,
- barras intermedias.

Las barras someras son las que se encuentran a menos de una tercera parte dentro del núcleo. Las barras profundas son las que se insertan a más de dos terceras partes del núcleo y las que se insertan dentro del núcleo entre $1/3$ y $2/3$ se les llama intermedias.

La respuesta de la potencia a los movimientos de las barras intermedias es generalmente difícil de predecir. Por eso es más deseable posicionar las barras someras y las profundas.

En general el retiro de las barras de control producirá cambios en la potencia local dentro de la región donde se retiran dichas barras.

3.2.1. Barras someras.

El retiro de las barras someras que se encuentran en la parte inferior del núcleo, incrementa las reacciones en cadena y consecuentemente también la potencia tiende a aumentar produciendo más burbujas, las cuales suben a la parte superior del núcleo, en esa posición existe un incremento de vacíos generando a su vez que la potencia decrezca en esa región.

Para esta situación, la potencia podría incrementarse lentamente o decrementarse y esto se debe a la dependencia de las magnitudes de la potencia que se incrementa en la parte inferior del núcleo y de la potencia que se decrementa en la parte superior del núcleo. Además sabemos que en la parte baja del núcleo no contiene vacíos o relativamente pocos haciendo que en esa área la potencia sea más alta. Con esto decimos que las condiciones de potencia en la parte inferior del núcleo resultan ser opuestas a los cambios de la potencia en la parte superior del núcleo.

En conclusión las barras someras generalmente cambian la forma de la potencia mientras que los efectos en la magnitud de la misma son mínimos. Por esta razón a las barras someras también se les llama barras de forma.

En la Figura 18 se presenta una gráfica donde se hace mover una barra somera de un juego de cuatro barras. Considere que la posición o muesca 48 es la parte máxima inferior del núcleo y la posición o muesca 0 es la parte máxima superior del núcleo (totalmente insertadas).

Como se puede visualizar cada vez que se inserta la barra de control desde la posición 48 hasta una inserción de doce muescas llegando a la muesca 36, el perfil axial de la potencia muestra que la forma comienza a cambiar, en la parte baja del núcleo se empieza a disminuir o achatarse mientras que en la parte alta del núcleo comienza a aumentar.

3.2.2. Barras profundas.

Con respecto a las barras profundas, la respuesta no tiene efectos pronunciados en la forma, sino que los efectos se presentan en la potencia de salida, por tal razón a este tipo de barras se les llama también barras de potencia.

Analógicamente al caso anterior, observe la Figura 19, se puede apreciar el comportamiento de la respuesta al movimiento de las barras de control profundas o de potencia.

3.3. Flujo de recirculación.

Ahora veremos los cambios en la respuesta con respecto al *flujo de recirculación*.

Un cambio en la recirculación se traduce en un cambio en los vacíos dentro del núcleo. Los vacíos se incrementan debido al incremento de la potencia en el núcleo, un incremento en el flujo dará como resultado un decrecimiento de los vacíos en cualquier plano del núcleo.

Un incremento en la potencia incrementa la temperatura del combustible causando más vacíos. La temperatura del combustible y los vacíos continuarán su incremento hasta llegar a un estado de reactividad negativa y esto provocará que el reactor caiga a un estado crítico, esto se debe a que los reactores BWR's tienen un coeficiente negativo de reactividad.

En conclusión, el resultado de incrementar el flujo es que se incrementa la potencia. Esto es muy deseable ya que la forma axial de la potencia se mantiene relativamente sin cambios.

Véase la Figura 20, muestra la respuesta de la forma de la potencia a la recirculación del flujo resaltando que se mantiene sin cambios de forma y sólo aumenta en magnitud.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

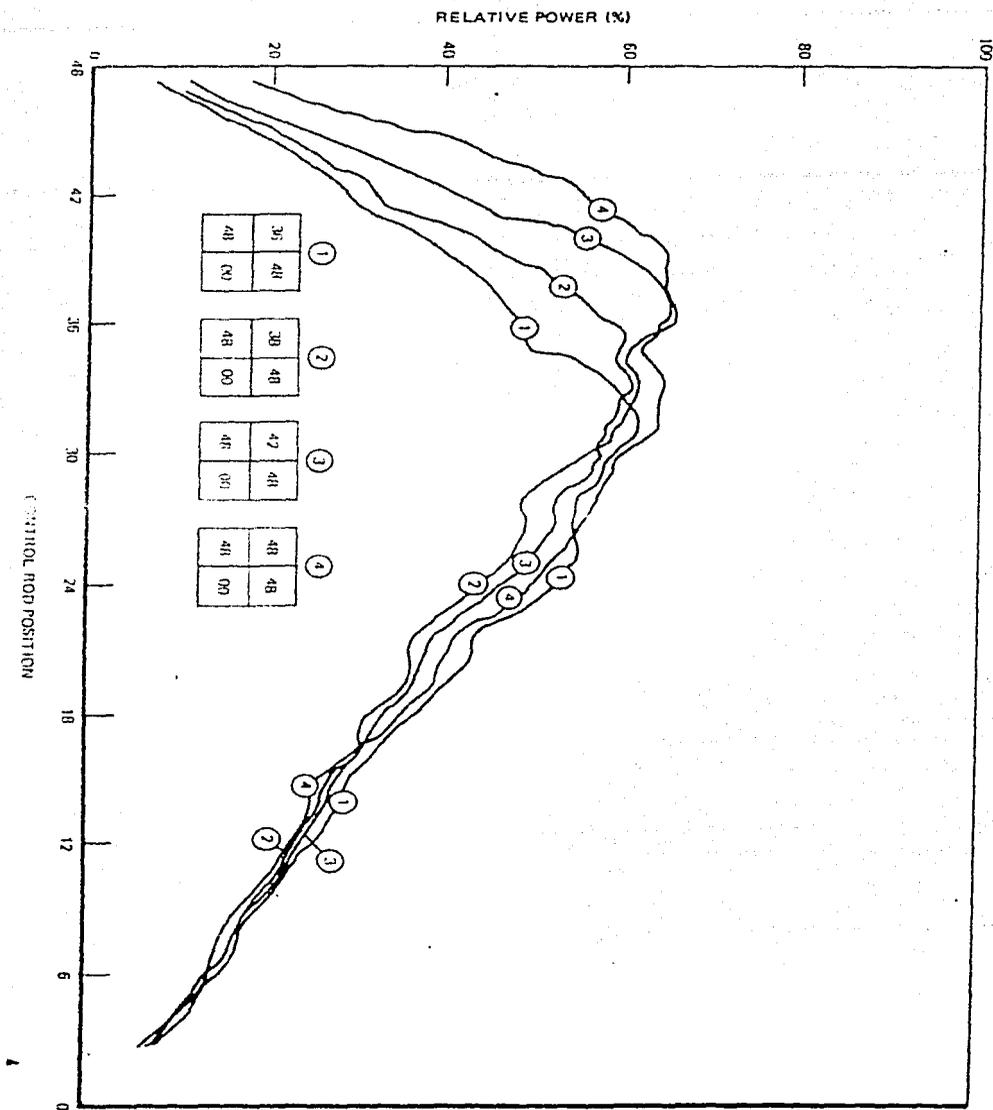


Fig. 18. Respuesta de la potencia a las barras de control someras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

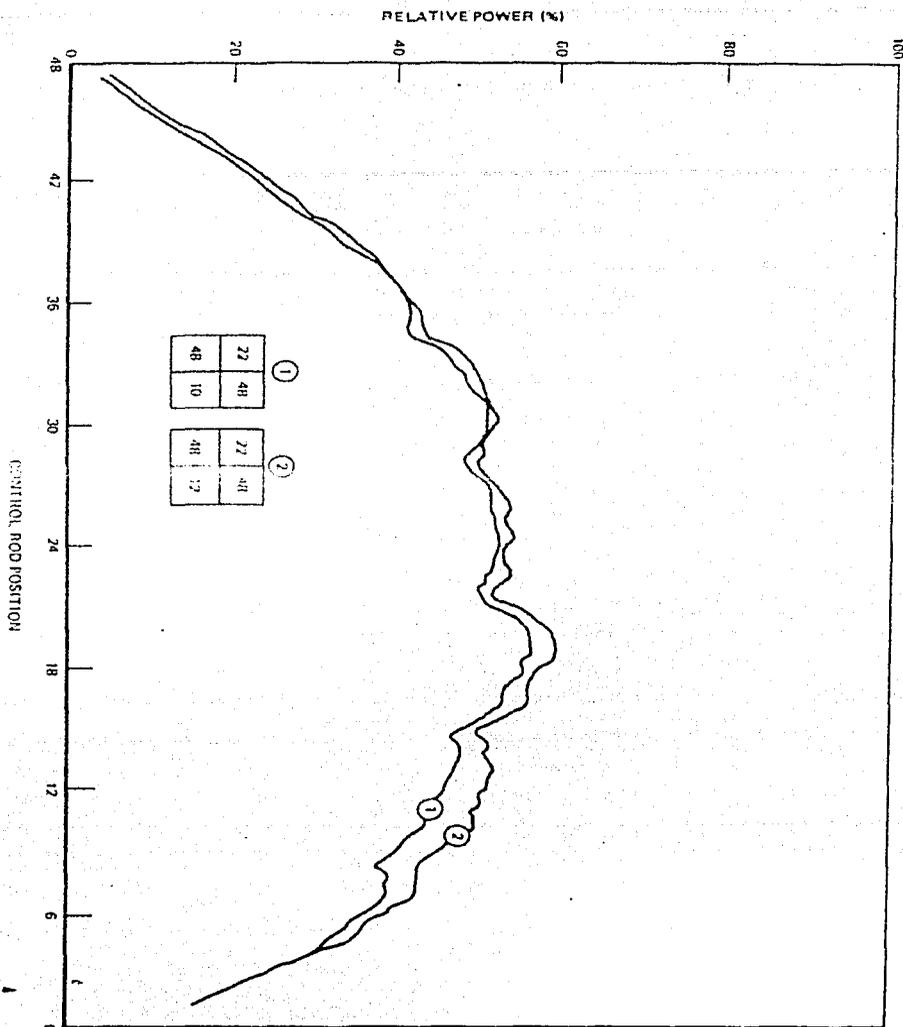


Fig. 19. Respuesta de la potencia a las barras de control profundas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

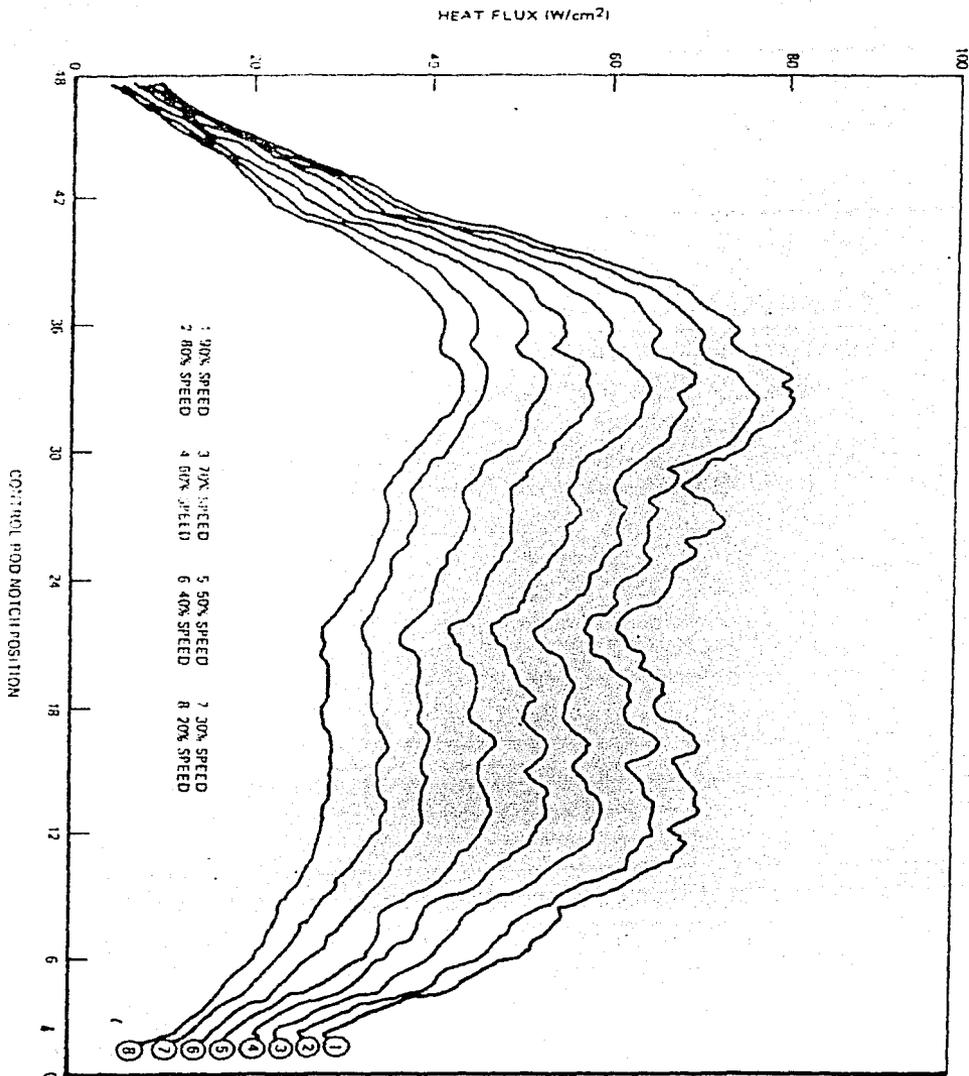


Fig. 20. Respuesta de la potencia al flujo de recirculación.

Capítulo 4

CONTROL DIFUSO.

4.1. El control y sus variables difusas.

El sistema desarrollado por medio de lógica difusa para el control de un reactor nuclear BWR, debe iniciarse primeramente identificando las variables a manejar. Por un lado debemos visualizar las variables de entrada y salida que nuestro sistema manejará en su proceso de control y por otro lado, de cada variable debemos obtener su propio conjunto difuso, delimitándolo con grados de pertenencia.

Como sabemos, dos parámetros importantes que nos indican las condiciones dentro del reactor son: la potencia y el factor de multiplicación de neutrones k , los cuales son identificables y medibles. Además tenemos conocimiento de que las formas de controlar el reactor son por medio de las barras de control y el flujo del refrigerante. Ya con esto, nos podemos dar una idea de cuales son las variables y de que forma contribuyen al control total del reactor nuclear BWR.

Recordemos que los movimientos de las barras de control nos ayudan a moldear la forma de la potencia dentro del reactor para tener una mejor distribución y no existan puntos calientes, recordemos también que el flujo refrigerante no afecta sustancialmente la forma de la potencia pero incrementa o decrementa su valor.

Con lo anterior podemos pensar en generar dos controles difusos que actúen según la necesidad del sistema, esto es, crear un control que de forma a la potencia y crear uno más que en vez de contribuir a la forma, contribuya a su valor.

Hasta aquí se puede atisbar que tendremos un control que maneje las barras de control y otro que manipule el flujo del refrigerante.

Para poder tener una idea de la forma de la potencia, se recurre al valor de la potencia nodal relativa máxima $pnrm$, que es un valor representativo de la distribución de la potencia dentro del núcleo. [H1]

Esta distribución de la potencia está dividida por conveniencia en varios componentes [H1]:

- Potencia relativa del ensamble combustible.
- Pico local.
- Pico axial.

La potencia relativa del ensamble combustible es la potencia máxima promedio del ensamble de combustible dividida entre la potencia promedio del núcleo del reactor. El pico de potencia local es la potencia que se presenta como máxima en una barra entre la potencia promedio del ensamble.

Para el calculo del factor pico de potencia axial, se recurre a dividir el núcleo en 25 nodos o volúmenes (la división de volúmenes puede ser variable), de esta manera el pico axial es resultado del cociente entre la potencia máxima promedio que se presenta en un nodo y la potencia promedio del núcleo.

Los factores pico de diseño son:

- Potencia relativa del ensamble.	1.50
- Pico axial.	1.50
- Pico local.	1.20
- Potencia nodal relativa máxima.	2.25

Los valores de diseño mostrados no son valores fijos, sino que pueden fluctuar dependiendo del tipo de combustible utilizado en el reactor. Por otro lado, para lograr un nivel de potencia constante, se debe mantener un factor de multiplicación de neutrones crítico ($k=1$).

Con los dos parámetros anteriores $pnrm$ y k se tienen ya las variables medibles y que se tomarán como variables de entrada del sistema.

Como se dijo anteriormente tendremos la posibilidad de controlar la forma de la potencia con las barras de control someras o de forma que serán en todo momento un parámetro a valorar.

Para el control del nivel de potencia del reactor nuclear, tendremos dos modalidades de manipulación, ligando la variable medible k con las barras de control profundas y con la tasa de flujo del refrigerante en dos sistemas; número uno y número dos respectivamente.

Cuando k cambia, utilizamos las barras de control profundas o de potencia donde sus características de respuesta no tienen efectos pronunciados en la forma de la potencia, sino que los efectos se presentan en la potencia de salida. Además otra forma de controlar el nivel de potencia del núcleo, es ajustando la tasa de flujo del refrigerante a través del núcleo sin cambiar la posición de las barras de control profundas.

En este momento al tener una panorámica general de como se deberá controlar el reactor, damos paso a la identificación de los dos controles difusos a desarrollar.

4.2. El control por barras.

4.2.1. Las variables difusas.

El control número uno consiste en dos variables de entrada y dos variables de salida identificadas como sigue:

Entradas:	k	- factor de multiplicación.
	$pnrm$	- potencia nodal relativa máxima.
Salidas:	bcp	- barras de control profundas.
	bcs	- barras de control someras.

A continuación se muestra el diagrama de bloques que representa primer sistema .

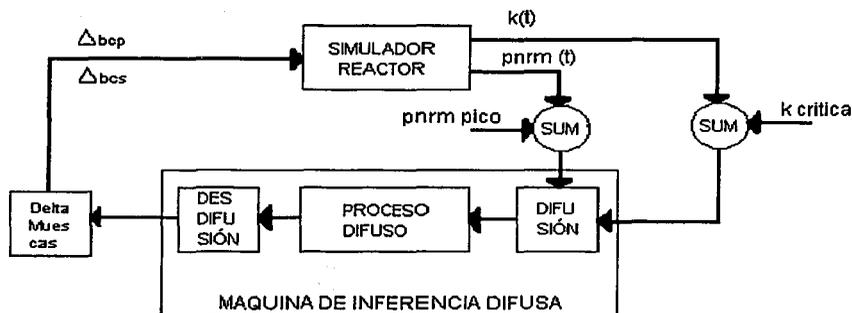


Fig. 21. Diagrama del Sistema de Control Difuso del primer sistema .

4.2.2. Los conjuntos difusos.

Las variables del sistema al entrar a la máquina de inferencia difusa son llevadas a un proceso de difusificación o difusión dando como resultado variables difusas, cada variable difusa contiene conjuntos difusos con una función de membresía correspondiente.

La variable difusa de entrada, factor de multiplicación k , tiene un universo del discurso de 0.99 a 1.01 dividido en tres conjuntos difusos los cuales son los siguientes: sbcrt (subcrítico), crt (crítico) y spcrt (supercrítico). Cada conjunto difuso se encuentra distribuido en todo el universo del discurso de k y muestra su propia función de membresía.

Conjuntos Difusos de la variable k :

- Los puntos que definen al conjunto sbcrt son: 0.99, 0.99, 0.9995
- Los puntos que definen al conjunto crt son: 0.997, 1.00, 1.0036
- Los puntos que definen al conjunto spcrt son: 1.0003, 1.01, 1.01

En la figura siguiente se muestra la variable difusa k y sus funciones de membresía.

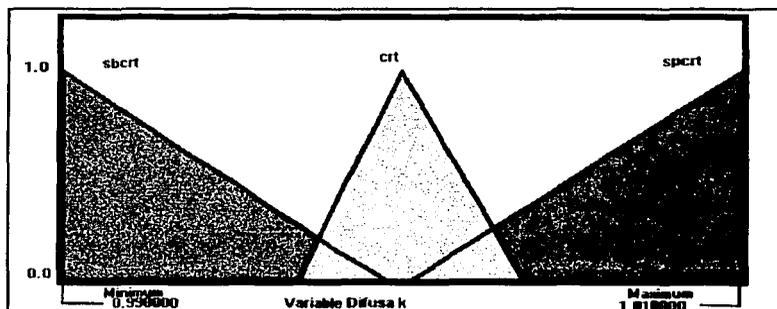


Fig. 22. Variable Difusa k .

Para la variable difusa de entrada, potencia nodal relativa máxima *pnrm*, se tiene un universo del discurso de 1.5 a 3.0, dividida en tres conjuntos difusos denominados: baja (potencia baja), normal (potencia normal) y alta (potencia alta), cada conjunto difuso está representado por una función de membresía triangular.

Conjuntos Difusos de la variable *pnrm*:

- Los puntos que definen al conjunto baja son: 1.5, 1.5, 2.25
- Los puntos que definen al conjunto normal son: 1.82, 2.25, 2.7
- Los puntos que definen al conjunto alta son: 2.25, 3.0, 3.0

Para visualizar mejor los datos anteriores a continuación se da una gráfica representativa de la variable difusa *pnrm* y sus funciones de membresía de cada conjunto difuso que la integran.

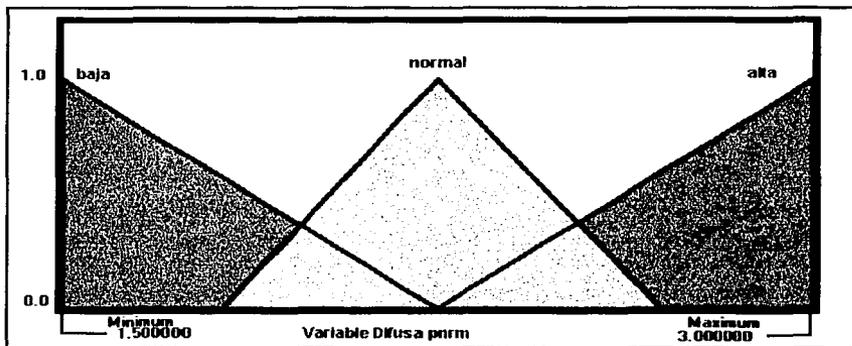


Fig. 23. Variable Difusa *pnrm*.

En el caso de las variables difusas de salida tenemos en primer plano a la variable de barras de control profundas *bcp*. Esta variable tiene como universo de discurso de 0 a 24. Cada conjunto difuso que la integra tiene una función de membresía triangular y están definidos por los nombres siguientes: *neg* (negativo), *cero*, *pos* (positivo).

Las barras de control profundas como se menciona en el capítulo tres, pueden ser puestas en movimiento a más de dos terceras partes del núcleo, es decir, desde la muesca 2 a la muesca 16, aunque es preferible moverlas desde la 4 a la 16.

Como el universo del discurso se define desde 0 al 24, se tomará al valor 12 como punto de referencia, es decir, a cada resultado se le restará el valor de referencia, si los valores obtenidos son negativos la acción deberá ser la inserción de barras, entonces el conjunto *neg* indica inserción, si de lo contrario el valor obtenido es positivo la acción a tomar será extraer barras, entonces el conjunto *pos* indica extracción.

Conjuntos Difusos de la variable *bcp*:

- Los puntos que definen al conjunto neg son: 0, 0, 11.5
- Los puntos que definen al conjunto cero son: 7, 12, 17
- Los puntos que definen al conjunto pos son: 12, 24, 24

La siguiente figura representa la variable difusa *bcp*.

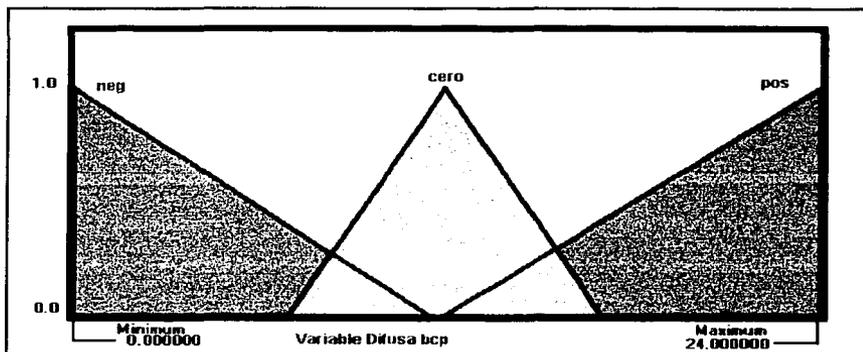


Fig. 24. Variable difusa *bcp*.

Como última variable difusa del sistema número uno, se tiene la variable barras de control someras *bcs*. En este caso se tiene el mismo universo de discurso y las mismas indicaciones, sólo que como sabemos las muescas especificadas para estas barras son desde la 32 a la 48.

Conjuntos Difusos de la variable *bcs*:

- Los puntos que definen al conjunto neg son: 0, 0, 12
- Los puntos que definen al conjunto cero son: 8, 12, 16
- Los puntos que definen al conjunto pos son: 12, 24, 24

La siguiente figura representa la variable difusa *bcs*.

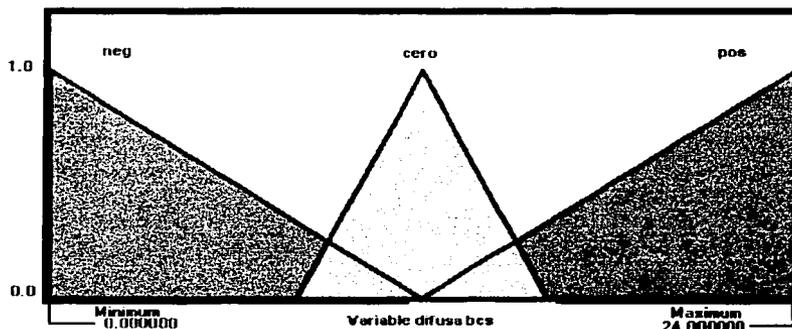


Fig. 25. Variable difusa *bcs*.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2.3. Reglas difusas

Una vez definidas las variables difusas con sus respectivos conjuntos difusos, el paso siguiente es jugar con los grupos buscando conexiones entre ellos. Así al estar relacionando los conjuntos difusos podemos llegar a una decisión.

Este grupo de relaciones entre conjuntos se lleva a cabo como se menciona en el capítulo uno, mediante reglas difusas.

Los enunciados condicionados, reglas difusas o heurísticas tienen la forma siguiente:

- Regla 1 :
SI k es sbert .ENTONCES. bcp es pos
- Regla 2 :
SI k es crt .ENTONCES. bcp es cero
- Regla 3 :
SI k es spcrt .ENTONCES. bcp es neg
- Regla 4 :
SI pnrm es baja .ENTONCES. bcs es pos
- Regla 5 :
SI pnrm es normal .ENTONCES. bcs es cero
- Regla 6 :
SI pnrm es alta .ENTONCES. bcs es neg

4.3. El control por flujo de recirculación.

4.3.1. Las variables difusas.

El control número dos consiste en dos variables de entrada y dos variables de salida identificadas como sigue:

- Entradas: k - factor de multiplicación.
 pnrm - potencia nodal relativa máxima.
- Salidas: flujo - flujo del refrigerante.
 bcs - barras de control someras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A continuación se muestra el diagrama de bloques que representa al segundo sistema.

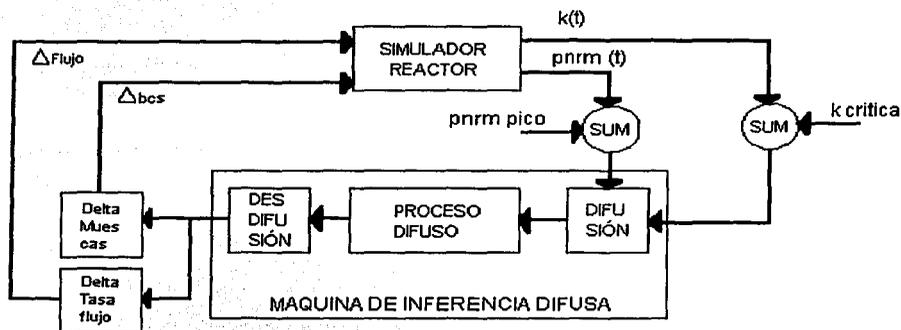


Fig. 26 Diagrama del Sistema de Control Difuso del segundo sistema

4.3.2. Los conjuntos difusos.

Las variables difusas $pnrm$ y bcs no cambian en sus conjuntos difusos, ya que en este momento el sistema actuará sólo para incrementar o disminuir el valor de la potencia cambiando la tasa del flujo del refrigerante.

Con lo anterior decimos que la variable difusa k , conserva el mismo universo del discurso sólo que sus conjuntos difusos que la integran cambian de soporte.

Conjuntos Difusos de la variable k :

- Los puntos que definen al conjunto $sbcr$ son: 0.99, 0.99, 0.9995
- Los puntos que definen al conjunto crt son: 0.996, 1.00, 1.004
- Los puntos que definen al conjunto $spcr$ son: 1.0005, 1.01, 1.01

En la figura siguiente se muestra la variable difusa k y sus funciones de membresía.

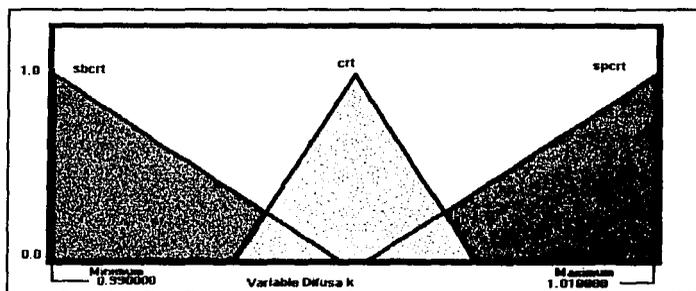


Fig. 27. Variable Difusa k .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la variable difusa *flujo*, se define en un universo del discurso de 93.0% a 107.0%, universo dividido en tres conjuntos difusos nombrados: baja (tasa baja), normal (tasa normal), alta (tasa alta).

Estos porcentajes están referidos al flujo nominal (7748.87 kg/s), al cual el reactor está operando al 100% de su potencia de diseño. Los límites del 93.0% y 107.0% representan un rango alrededor del cual el operador puede, de acuerdo a las especificaciones técnicas de operación, disminuir o incrementar el flujo para controlar el reactor nuclear.

Conjuntos difusos de la variable *flujo*:

- Los puntos que definen al conjunto baja son: 93, 93, 100
- Los puntos que definen al conjunto normal son: 95.5, 100, 104.5
- Los puntos que definen al conjunto alta son: 100, 107, 107

En la Figura 28 se muestra la representación difusa de la variable *flujo*.

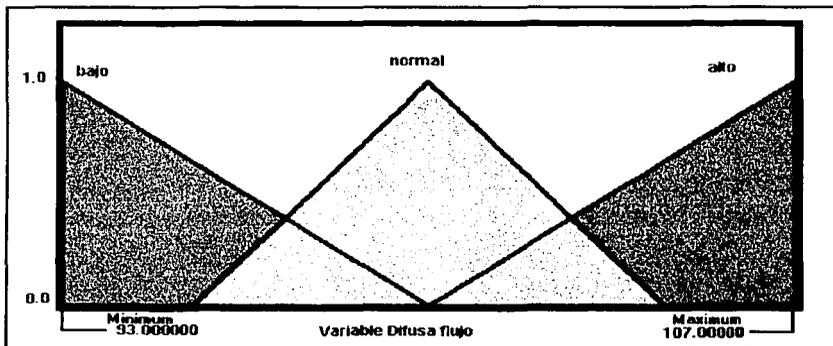


Fig. 28. Variable Difusa flujo.

4.3.3. Reglas Difusas.

Las reglas que representan al sistema número dos son la siguientes:

- Regla 1 :
SI k es sbcrt .ENTONCES. flujo es alto
- Regla 2 :
SI k es crt .ENTONCES. flujo es normal
- Regla 3 :
SI k es spcrt .ENTONCES. flujo es bajo
- Regla 4 :
SI pnrn es baja .ENTONCES. bcs es pos
- Regla 5 :

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SI $pnrm$ es normal .ENTONCES. bcs es cero
 Regla 6 :
 SI $pnrm$ es alta .ENTONCES. bcs es neg

4.4. La inferencia.

El control difuso que se presenta en este trabajo es moldeado y simulado mediante un programa llamado Fuzzle 3.0 [M2], que genera las variables difusas, sus conjuntos difusos que las integran, relaciona los conjuntos por medio de reglas, etc. Gracias a este programa podemos afinar nuestros conjuntos difusos para poder obtener una respuesta deseada a las condiciones que van tomando las variables de entrada.

La utilización de este programa se lleva a cabo mediante ambiente windows, así, los conjuntos difusos son creados por medios gráficos y las reglas desarrolladas son simples y fáciles de interpretar. Para los procesos de inferencia el software fuzzle 3.0, tiene tres alternativas u opciones a escoger.

Como se describe en el capítulo uno, hay muchas formas de implicación difusas para obtener la relación de conjuntos difusos, mostrándose diferentes caminos para llegar a la inferencia.

El programa aquí utilizado contiene dos formas de implicación difusa que se mostraron en el capítulo citado líneas atrás (implicación min de Mamdani y product de Larsen, conocidos también como max-min y max-product respectivamente).

Se podría manejar el control difuso, utilizando cualquier implicación, cada una tiene una ventaja y tal vez encontremos algún beneficio si tomáramos alguna en particular.

A continuación se muestran dos ejemplos donde se toma a una variable de entrada como constante mientras que la otra la hacemos incrementarse de un valor mínimo de su universo del discurso a un valor máximo.

Nótese la diferencia que hay entre la implicación *max-min* y *max-product*, son casi iguales.

Lo que está en las líneas siguientes, son los resultados que muestran las dos formas de implicación que tiene el software utilizado (vease Figura 29 y 30).

En el inciso (a) se deja constante el valor de k , mientras que el valor de $pnrm$ se varía de forma creciente. Para el inciso (b) la constante es el valor de $pnrm$ y el valor a variar es k .

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

(a)

mamdani: $k=1.0 \rightarrow bcp=12.00$
 larsen: $k=1.0 \rightarrow bcp=11.975$

bcs:	mamdani	larsen
	20.0	19.9
	20.0	19.9
	20.0	19.8
	20.0	19.8
	20.0	19.7
	19.8	19.5
	19.7	19.4
	19.2	18.9
	18.4	18.2
	16.0	15.7
	15.7	15.4
	14.5	14.0
	13.7	13.2
	13.4	12.9
	13.0	12.6
	12.6	12.3
	12.0	12.0
	10.3	10.8
	8.3	8.6
	6.9	6.9
	5.0	5.2
	4.3	4.6
	4.1	4.4
	4.1	4.3
	4.0	4.0
	4.0	4.0

(b)

mamdani: $pnrm=2.25 \rightarrow bcs=12.00$
 larsen: $pnrm=2.25 \rightarrow bcs=11.96$

bcp:	mamdani	Larsen
	20.0	19.8
	20.0	19.7
	19.7	19.3
	19.6	19.2
	19.4	19.0
	19.1	18.8
	18.8	18.5
	16.8	16.7
	15.0	14.8
	13.9	13.6
	13.0	12.7
	12.2	12.1
	12.0	12.0
	12.0	12.0
	11.8	11.9
	11.6	11.8
	10.7	11.0
	10.1	10.4
	8.0	8.1
	7.6	7.7
	4.8	5.0
	4.7	4.9
	4.0	4.3
	3.9	4.1
	3.8	4.0
	3.8	4.0
	3.8	3.8

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

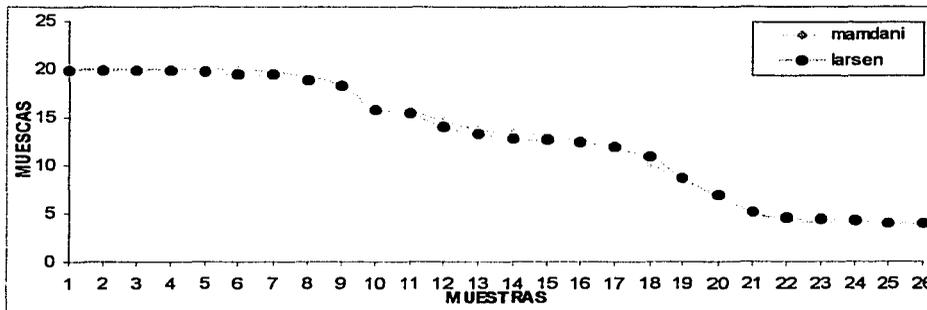


Fig. 29. Comparación de diferentes implicaciones utilizando FUZZLE 3.0 para el inciso (a).

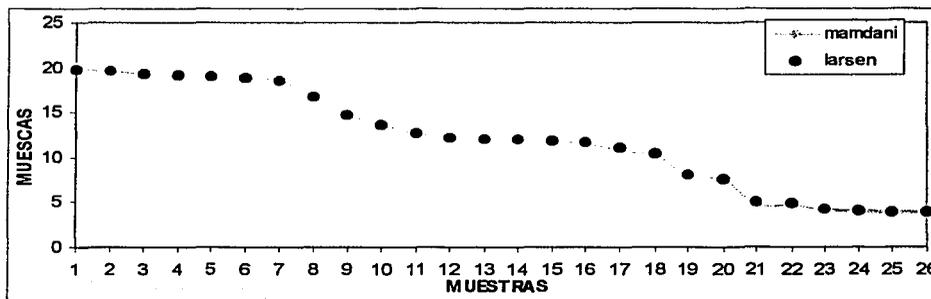


Fig. 30. Comparación de diferentes implicaciones utilizando FUZZLE 3.0 para el inciso (b).

De esta manera, el proceso difuso se lleva a cabo mediante el software FUZZLE 3.0, y el razonamiento difuso utilizado es el mínimo de Mamdani, ya que al igual que el método de producto de Larsen se usan de manera común y frecuente debido a su simplicidad y eficiencia computacional, además, como se puede ver en los resultados, los dos razonamientos difusos tienen una gran similitud en sus respuestas, por lo que es indistinto usar cualquiera de los dos métodos.

4.5. Desdifuzificación.

Para este proceso se utiliza el método de centro de masa, que el programa utiliza para la transformación de datos difusos a datos crisp.

En el anexo del presente trabajo de tesis, se abordan pruebas independientes de los controles desarrollados en este capítulo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 5

EL SISTEMA.

En el capítulo anterior se presenta la descripción de los controles del reactor nuclear. Ahora, viene el siguiente paso, consistente en la integración de los controles en el sistema. Es decir, se enlaza el código del simulador CM-PRESTO con el código del control difuso desarrollado, dando lugar a integrar un solo sistema.

5.1. El sistema reactor nuclear.

El sistema *reactor nuclear BWR* a controlar, se presenta en este trabajo como un sistema virtual que por medio de un software recrea las condiciones de trabajo dentro del reactor nuclear BWR de la Planta Nucleoeléctrica Laguna Verde.

El simulador mencionado anteriormente se llama CORE-MASTER PRESTO (CM-PRESTO), el cual es un programa que simula el comportamiento del núcleo del reactor en estado estable.

El código CM-PRESTO puede simular el comportamiento del núcleo del reactor con tres diferentes opciones: núcleo completo sin restricciones de simetría, un cuarto, medio o un octavo del núcleo con simetría de reflexión.

El núcleo, como se explica en el capítulo dos, está compuesto de un arreglo de ensambles combustibles en forma reticular regular. El arreglo de ensambles combustibles constituye una subdivisión física del núcleo, que también se introduce en el simulador. Cada ensamble, además, es subdividido axialmente, generalmente de 24 a 25 segmentos. Las unidades geométricas idénticas así obtenidas son llamadas nodos. Las partes de agua que rodea a los ensambles también se incluyen en los nodos.

Las principales variables nodales (como la densidad de potencia, la fracción de vacíos, etc.) calculadas por CM-PRESTO representan valores promedio de cada nodo.

5.2. El sistema de control difuso del reactor nuclear BWR.

El capítulo cuarto de esta tesis, declara que el programa *Fuzzle 3.0* crea el código fuente de nuestro control difuso, este código debe adaptarse a las necesidades del simulador CM-PRESTO, es decir, debe de acondicionarse de tal manera que sea parte de un solo sistema.

La fig. 1 mostrada al final del capítulo, presenta el diagrama de flujo del sistema que contiene al simulador CM-PRESTO, los controles difusos desarrollados y la herramienta que ayuda a tener un sistema capaz de realizar la tarea específica de controlar un reactor nuclear BWR,

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tomando como ejemplo el simulador que recrea a la planta nucleoelectrónica Laguna Verde.

El diagrama muestra una serie de pasos descritos a continuación.

Primero.- Se introduce el patrón de arranque del reactor, el cual es colocado por el operador.

Segundo.- Los datos son llevados al simulador, éste arroja como resultado las condiciones de la potencia y reactividad nuclear.

Tercero.- Los valores obtenidos son comparados contra el valor críticos del factor de multiplicación y la potencia del reactor, para saber si el reactor está crítico o necesita pasar a la etapa de control.

Cuarto.- Puede ocurrir que el operador al colocar el primer patrón de barras, los valores de k o de $pnrm$ se hayan disparado fuera del rango permitido dentro del programa de los controladores de lógica difusa. Esto se debe a la mala colocación de las barras de control, ya que el flujo se mantiene en su valor estándar de inicio.

Para poder controlar ese problema, el programa inserta o retira barras de potencia según la necesidad, hasta comprobar que los parámetros en cuestión queden dentro de los valores establecidos.

La inserción o retiro de barras no se hace con el fin de controlar el reactor, sólo se mueven en los extremos, es decir, si el factor de multiplicación es menor a 0.99, algunas barras profundas son retiradas completamente para que se de una mayor reactividad nuclear y el valor de k aumente y llegue a ser mayor o igual a 0.99, y si el valor de k es mayor a 1.01, algunas barras profundas son insertadas completamente para que la reactividad nuclear disminuya y el valor del factor de multiplicación se reduzca, hasta llegar a ser menor o igual a 1.01.

Quinto.- En esta etapa el programa está apto para realizar el control difuso por dos vías a elección del operador, por medio de las barras de control profundas o por el flujo del refrigerante.

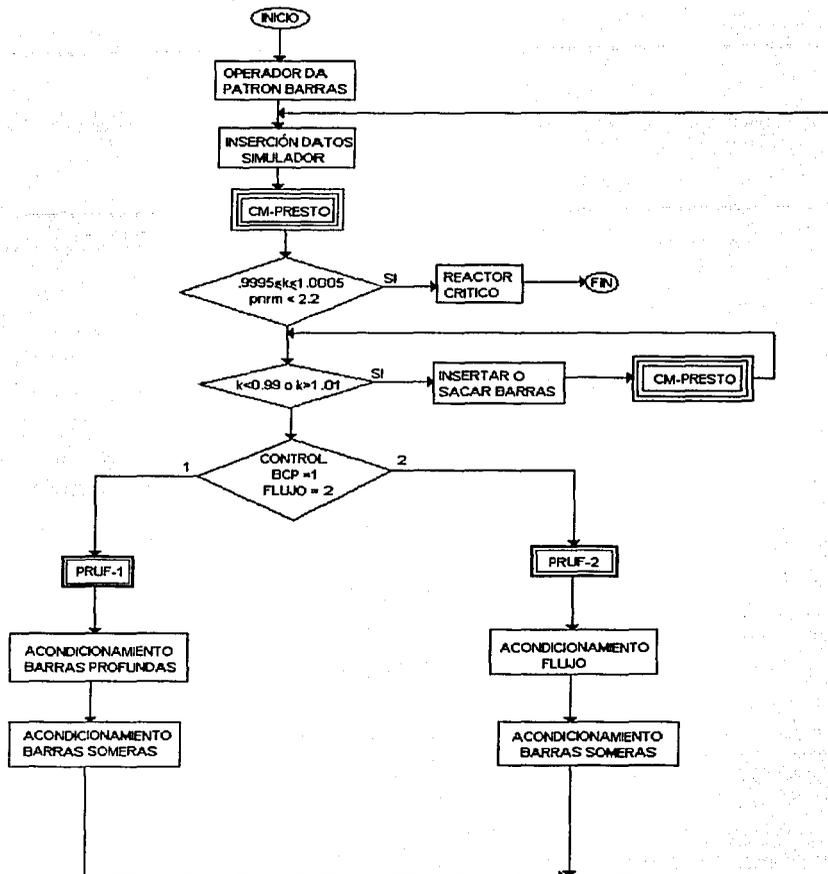
Como se dijo en el capítulo tercero, los resultados obtenidos por la manipulación de las barras de potencia (barras profundas) y por el flujo del refrigerante, no tiene efectos pronunciados en la forma, sino que los efectos se presentan en la potencia de salida. Por otro lado, el control por barras es más rápido y el del flujo es más lento y más fino, por lo que en esta etapa es conveniente iniciar el control difuso por barras de potencia y finalizar con el control difuso por flujo.

Sexto.- El programa ejecuta el control difuso por cualquier vía seleccionada, con valores de entrada provenientes del simulador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Séptimo.- Los valores, resultado de los controles difusos, deberán pasar por un proceso de acondicionamiento que permita su validación al introducirlos nuevamente al simulador. El proceso se repite una vez más desde el segundo paso hasta que el reactor se encuentre crítico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CM-PRESTO, SIMULADOR DEL SISTEMA
 PRUF-1, CONTROL DIFUSO POR BARRAS
 PRUF-2, CONTROL DIFUSO POR FLUJO

Fig. 31. Diagrama de flujo del sistema.

Capítulo 6

RESULTADOS.

Una vez que se ha implementado el sistema difuso al simulador CM-PRESTO, como está indicado en el diagrama de flujo del capítulo anterior, a continuación se presentan los resultados obtenidos de nueve pruebas realizadas.

6.1. Consideraciones al sistema reactor nuclear.

Como se dijo anteriormente, el simulador CM-PRESTO puede simular el comportamiento del núcleo del reactor con tres diferentes opciones, siendo éstas, núcleo completo sin restricciones de simetría, un cuarto, medio o un octavo del núcleo con simetría de reflexión.

Así que en las pruebas realizadas se considera la utilización de un cuarto de núcleo del reactor con simetría de reflexión. Esto debido a lo factible que resulta en la captura de datos.

El programa está basado en lo siguiente:

- Las barras someras se mueven desde la muesca 48 hasta la muesca 24, pero es más preferible que su rango se encuentre desde 48 hasta 32.
- Las barras profundas se mueven desde la muesca 2 hasta la muesca 24, aunque es preferible que tenga un rango desde 4 hasta 20.
- La distribución que tendrán las barras dentro del cuarto de núcleo será sujeta a grupos y subgrupos.
- En un grupo, es prioridad que los movimientos de los subgrupos sean en la secuencia ascendente, es decir, 1, 2, 3.
- Los grupos y subgrupos de las barras quedan de la siguiente manera:
 - Grupo 1: 11, 12.
 - Grupo 2: 21, 22, 23.

A continuación se presenta la ubicación que tendrán los subgrupos de las barras en la representación de un cuarto de núcleo del reactor con simetría de reflexión.

22		12			
11		21		12	
23		11		22	

6.2. Las pruebas realizadas.

Como se menciona al principio, se realizaron nueve pruebas que al final del capítulo se presentan, primero, en su representación de cuarto de núcleo, en donde se muestra paso a paso el cambio en un patrón de barras y del flujo de recirculación. Después se presentan algunas gráficas que ayudan a visualizar de mejor manera la convergencia del sistema en cada una de las pruebas. El estado de criticidad se consideró como $k = 1 \pm 0.00095$

En las dos primeras pruebas, el estado de criticidad se alcanza en dos iteraciones, debido al patrón inicial que se coloca.

Las pruebas restantes, donde el simulador CM-PRESTO obtuvo tres o más iteraciones, el valor del factor de multiplicación k , presenta un comportamiento suave y sistemático, sólo en las pruebas 7 y 9 tiene un pequeño salto de 0.999 a 0.9999, mientras que para la prueba 9 es de 0.999 a 0.99938.

Con respecto al comportamiento de la potencia nodal relativa máxima pn_{rm} , los comportamientos son semejantes a los observados en k , sólo que en las pruebas 8 y 9 se producen variaciones más marcadas.

Si nos ubicamos en la prueba 3, el control es tomado por el flujo de recirculación, así que en tres iteraciones llega a un estado crítico, sin mover ninguna barra de control. Para este caso, si nos referimos a las gráficas del factor de multiplicación k y el flujo de recirculación, se identifica a simple vista una relación casi proporcional.

En relación a la prueba 5, donde el control es por medio de las barras de control, se observa que tiene una iteración más que en la prueba 3, pero esto ocurre por el patrón inicial que provoca que el valor de k sea más elevado en comparación a lo ocurrido en la prueba 3.

Siguiendo el caso en la prueba 6, la cual toma el mismo patrón de inicio de la prueba 5, hay una variante de control en la secuencia, siendo ésta la siguiente: barras-flujo-barras, el último cambio, se da a causa del valor máximo que tiene el flujo de recirculación (8291.29kg/seg), y que dado que no se puede incrementar, es necesario mover las barras de control para lograr la criticidad.

Al ver la gráfica de k para la prueba 6, se puede apreciar en la última iteración, es decir, en el último cambio de control, que el valor del factor de multiplicación llega más rápido a su estado crítico, que corresponde al cambio de control por flujo a control por barras de control.

En las pruebas 7, 8 y 9, se inicia con el mismo patrón, pero cada caso lleva un control en diferentes direcciones.

En el caso de la prueba 7, el control fue exclusivo de las barras de control, con cuatro iteraciones el sistema alcanza el estado de criticidad.

Para la prueba 8, se utiliza el control por flujo de recirculación en la tercera, cuarta y quinta iteración, después de la quinta iteración el flujo de recirculación a tomado su valor mínimo y no se mueve más, de

ahí que el control pasa a ser nuevamente de las barras de control. Debido a tener un control intermedio por medio del flujo de recirculación el proceso de control del sistema se alarga, llegando así a tener ocho iteraciones.

En la prueba 9 se realiza lo que se puede nombrar como la mejor secuencia de control, aunque se llegue a cinco iteraciones, una más que lo ocurrido en la prueba 7, el valor de k obtenido en el estado crítico del reactor esta más cerca de la unidad.

La secuencia de control referida inicia con barras, ya que el valor de k está muy elevado, cuando el valor del factor de multiplicación se acerca a un estado crítico, ocurriendo ésto en la tercera iteración, el control pasa a ser gobernado por el flujo de recirculación, el control se vuelve más lento, pero más puntual y fino, dando como resultado una aproximación mucho más acertada a la unidad.

Como se puede ver, el patrón inicial determina como primera señal, qué tan rápido puede ser el control y en segundo lugar, la secuencia de control que se use, ya que el control por barras produce cambios más importantes en la reactividad del reactor, comparado con el control por flujo de recirculación.

En todas las pruebas se observó también que no existe una relación independiente entre las barras profundas y el valor de k o entre las barras de control someras y la potencia nodal relativa o entre el flujo de recirculación y el valor del factor de multiplicación, a pesar de que el flujo de recirculación o las barras de control profundas pesen más en el valor del factor de multiplicación k , también existe una modificación a la potencia $pnrm$. Lo anterior se puede ver en cada una de las pruebas.

Por ejemplo, en la prueba 8, la primera iteración se controla por barras de control profundas, las siguientes dos iteraciones las gobierna el flujo de recirculación, las barras de control someras no se mueven, pero el valor de la potencia nodal relativa máxima sufre cambios.

Finalmente, cabe mencionar que el control basado en lógica difusa que se acopló al simulador CM-PRESTO, se comportó de acuerdo a lo esperado, tanto en su respuesta con las barras de control, como con el flujo de recirculación.

Con esto se termina la descripción de los resultados dando paso en el siguiente capítulo a las conclusiones del presente trabajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

48	48			
8	8	48		
48	8	48		

Prueba: 1-1

$k = 0.99742$
 $pnrm = 2.054$
 $flujo = 7748.87$

48	12			
12	48	12		
48	12	48		

Prueba: 3-1

$k = 0.99822$
 $pnrm = 2.147$
 $flujo = 7748.87$

48	48			
8	12	48		
48	8	48		

Prueba: 1-2

Control: Barras

$k = 0.99928$
 $pnrm = 1.973$
 $flujo = 7748.87$
ESTADO CRÍTICO

48	12			
12	48	12		
48	12	48		

Prueba: 3-2

Control: Flujo

$k = 0.99935$
 $pnrm = 2.112$
 $flujo = 8039.68$

40	48			
12	6	48		
48	12	40		

Prueba: 2-1

$k = 0.99845$
 $pnrm = 1.925$
 $flujo = 7748.87$

48	12			
12	48	12		
48	12	48		

Prueba: 3-3

Control: Flujo

$k = 1.00032$
 $pnrm = 2.079$
 $flujo = 8288.00$
ESTADO CRÍTICO

46	48			
12	6	48		
48	12	46		

Prueba: 2-2

Control: Flujo

$k = 0.99951$
 $pnrm = 1.975$
 $flujo = 8028.59$
ESTADO CRÍTICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6		48			
48		6		48	
6		48		6	

Prueba: 4-1

$k = 0.99641$
 $pnrm = 2.342$
 $\text{flujo} = 7748.87$

6		48			
44		6		48	
6		44		6	

Prueba: 4-2
Control: Flujo

$k = 0.99787$
 $pnrm = 2.237$
 $\text{flujo} = 8122.36$

6		48			
44		8		48	
10		44		6	

Prueba: 4-3
Control: Barras

$k = 0.99871$
 $pnrm = 2.195$
 $\text{flujo} = 8122.36$

6		48			
48		10		48	
10		48		6	

Prueba: 4-4
Control: Barras

$k = 0.99963$
 $pnrm = 2.211$
 $\text{flujo} = 8122.36$
ESTADO CRÍTICO

48		4			
4		48		4	
48		4		48	

Prueba: 5-1

$k = 0.98886$
 $pnrm = 2.694$
 $\text{flujo} = 7748.87$

48		8			
8		48		8	
48		8		48	

Prueba: 5-2
Control: Automático*

$k = 0.99308$
 $pnrm = 2.407$
 $\text{flujo} = 7748.87$

44		8			
16		44		8	
44		16		44	

Prueba: 5-3
Control: Barras

$k = 0.99759$
 $pnrm = 2.114$
 $\text{flujo} = 7748.87$

44		8			
20		48		8	
44		20		44	

Prueba: 5-4
Control: Barras

$k = 0.99959$
 $pnrm = 2.065$
 $\text{flujo} = 7748.87$
ESTADO CRÍTICO

*Automático.

Cuando el patrón inicial provoca que el valor de k se encuentre fuera de los límites que establece el sistema de control, el control manda introducir o sacar las barras hasta obtener un valor de k que corresponda a las características necesarias del control.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

48	4			
4	48	4		
48	4		48	

Prueba 6-1

k = 0.98886
 pnrn = 2.694
 flujo = 7748.87

48	8			
8	48	8		
48	8		48	

Prueba: 6-2
 Control: Automático

k = 0.99308
 pnrn = 2.407
 flujo = 7748.87

44	8			
8	44	8		
44	8		44	

Prueba: 6-3
 Control: Flujo

k = 0.99509
 pnrn = 2.273
 flujo = 8258.69

44	8			
8	44	8		
44	8		44	

Prueba: 6-4
 Control: Flujo

k = 0.99521
 pnrn = 2.269
 flujo = 8291.29

44	8			
16	44	8		
44	16		44	

Prueba: 6-5
 Control: Barras

k = 0.99967
 pnrn = 2.047
 flujo = 8291.29
 ESTADO CRÍTICO

20		48		
48		16	48	
48		48		20

Prueba: 7-1

k = 1.00755
 pnrn = 2.065
 flujo = 7748.87

20		48		
48		8	48	
48		48		20

Prueba: 7-2
 Control: Barras

k = 1.00366
 pnrn = 2.256
 flujo = 7748.87

12		48		
48		4	48	
48		48		12

Prueba: 7-3
 Control: Barras

k = 0.999
 pnrn = 2.443
 flujo = 7748.87

12		44		
44		4	44	
44		44		12

Prueba: 7-4
 Control: Barras

k = 0.9999
 pnrn = 2.225
 flujo = 7748.87
 ESTADO CRÍTICO

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

20		48		
48		16		48
48		48		20

Prueba: 8-1

$$k = 1.00755$$

$$pnrm = 2.065$$

$$\text{flujo} = 7748.87$$

20		48		
48		8		48
48		48		20

Prueba: 8-2
Control: Barras

$$k = 1.00366$$

$$pnrm = 2.256$$

$$\text{flujo} = 7748.87$$

20		48		
48		8		48
48		48		20

Prueba: 8-3
Control: Flujo

$$k = 1.0023$$

$$pnrm = 2.292$$

$$\text{flujo} = 7370.88$$

20		48		
48		8		48
48		48		20

Prueba: 8-4
Control: Flujo

$$k = 1.00199$$

$$pnrm = 2.303$$

$$\text{flujo} = 7284.94$$

20		48		
44		8		48
48		44		20

Prueba: 8-5
Control: Flujo

$$k = 1.00202$$

$$pnrm = 2.241$$

$$\text{flujo} = 7284.94$$

20		48		
44		6		48
48		44		20

Prueba: 8-6
Control: Barras

$$k = 1.00119$$

$$pnrm = 2.281$$

$$\text{flujo} = 7284.94$$

18		48		
44		4		48
48		44		18

Prueba: 8-7
Control: Barras

$$k = 1.0007$$

$$pnrm = 2.331$$

$$\text{flujo} = 7284.94$$

18		44		
40		4		44
44		40		18

Prueba: 8-8
Control: Barras

$$k = 1.0001$$

$$pnrm = 2.128$$

$$\text{flujo} = 7284.94$$

ESTADO CRÍTICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

20		48		
48		16		48
48		48		20

Prueba: 9-1

$k = 1.00755$
 $pnrm = 2.065$
 $flujo = 7748.87$

20		48		
48		8		48
48		48		20

Prueba: 9-2

Control: Barras

$k = 1.00366$
 $pnrm = 2.256$
 $flujo = 7748.87$

12		48		
48		4		48
48		48		12

Prueba: 9-3

Control: Barras

$k = 0.999$
 $pnrm = 2.443$
 $flujo = 7748.87$

12		48		
42		4		48
48		42		12

Prueba: 9-4

Control: Flujo

$k = 0.99938$
 $pnrm = 2.443$
 $flujo = 7593.89$

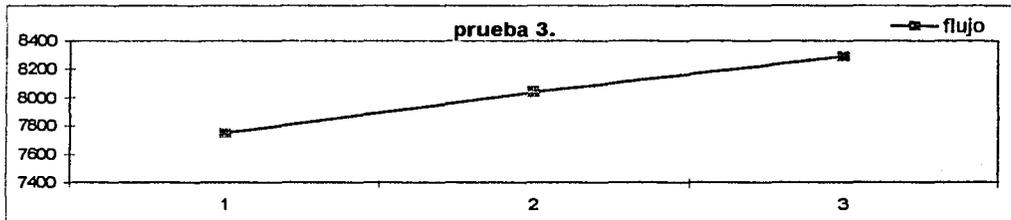
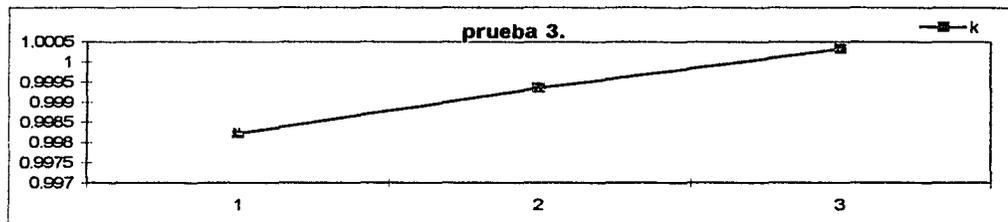
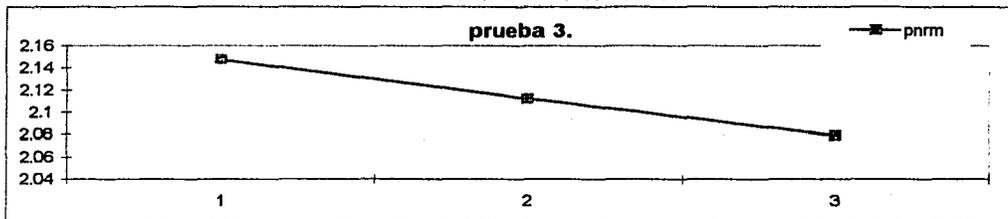
12		48		
42		4		48
48		42		12

Prueba: 9-5

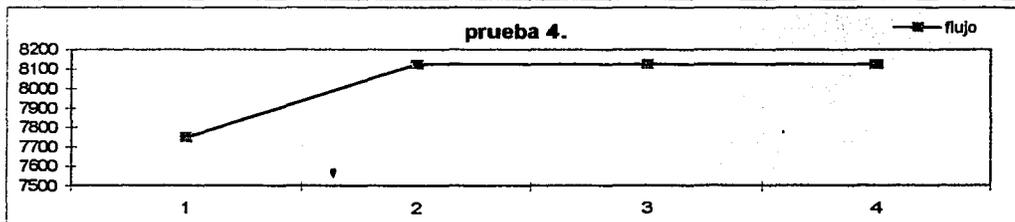
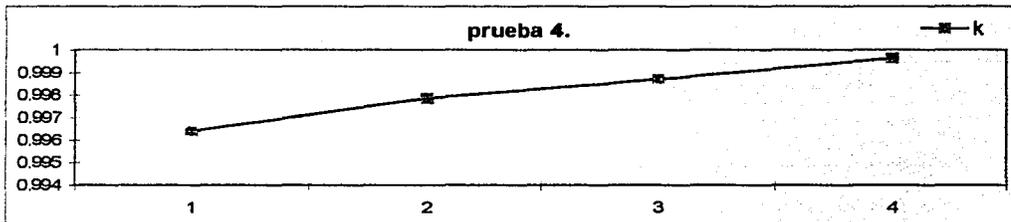
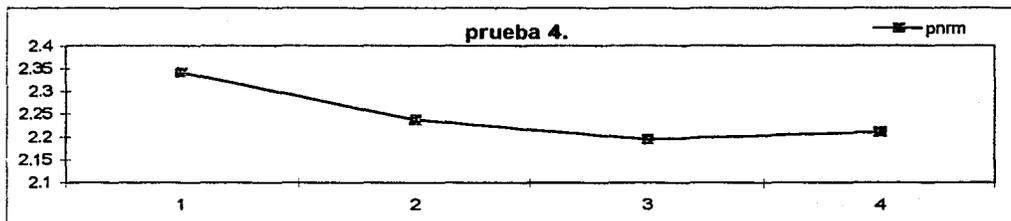
Control: Flujo

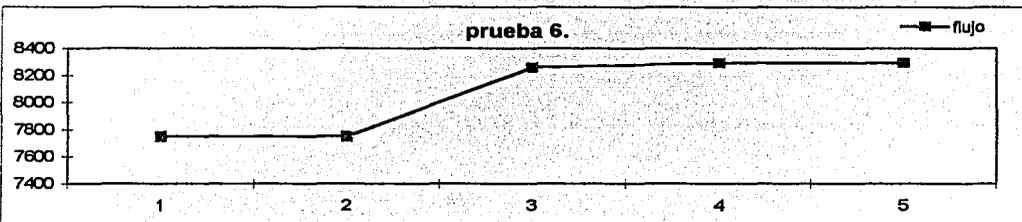
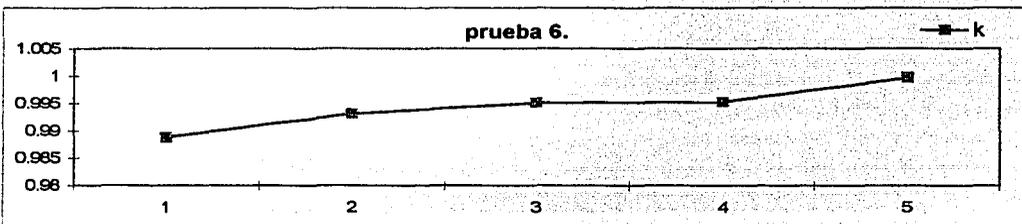
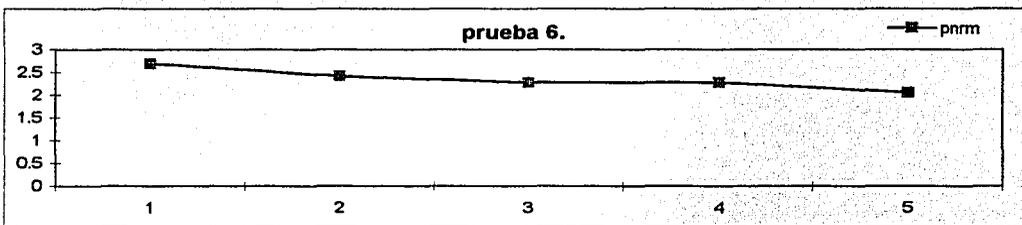
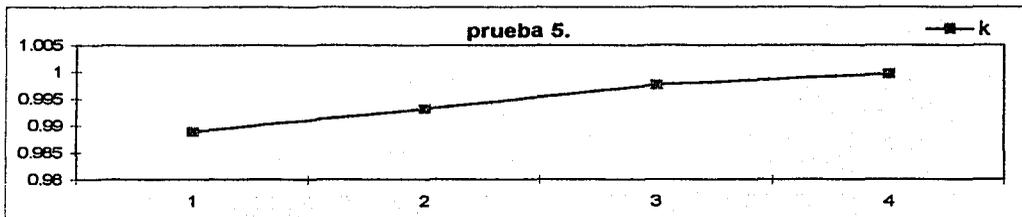
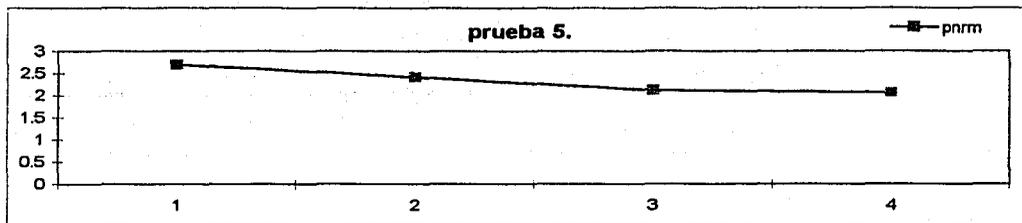
$k = 0.99995$
 $pnrm = 2.258$
 $flujo = 7751.12$
ESTADO CRÍTICO

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

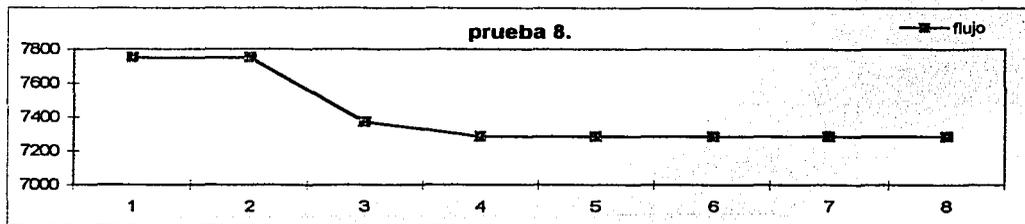
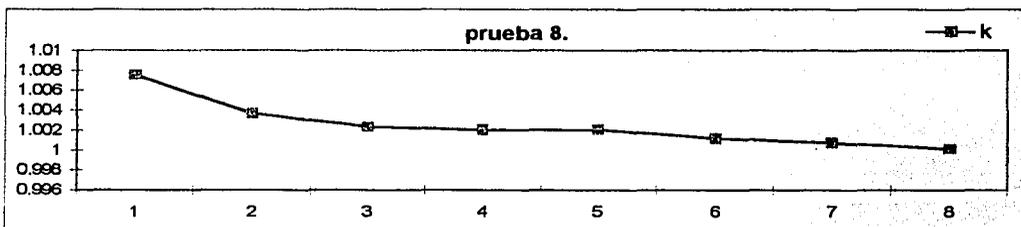
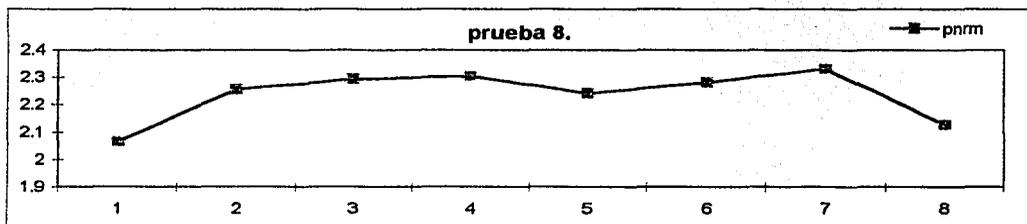
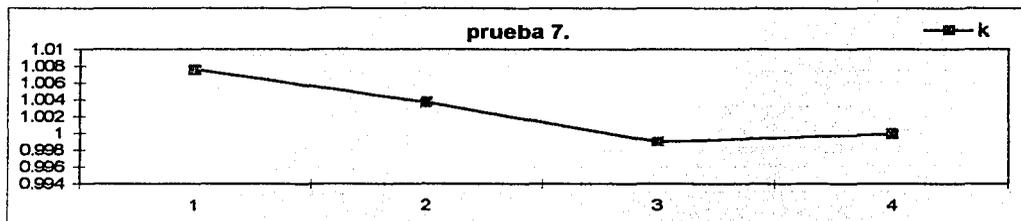
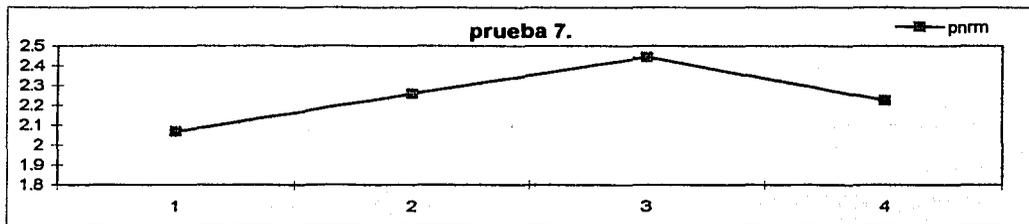


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

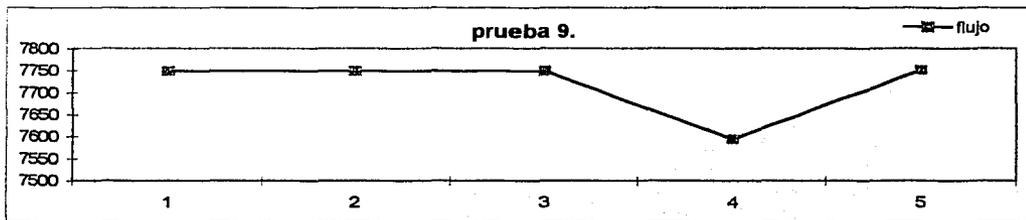
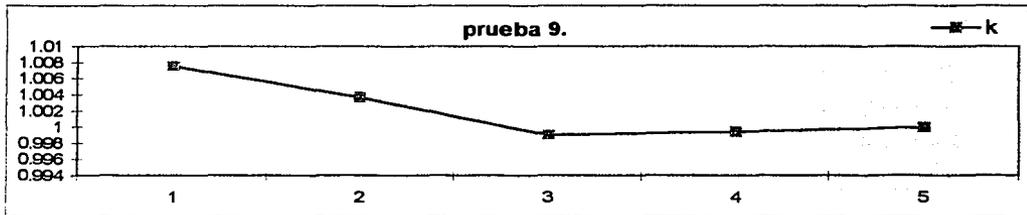
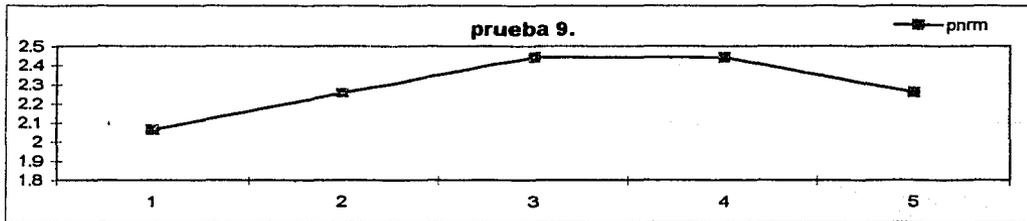




TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 7

CONCLUSIONES.

En esta tesis ha sido revisada y validada la utilización de una metodología alternativa de control, basada en la lógica difusa, la cual emplea un diseño que domina al reactor nuclear BWR de la planta nucleoelectrónica Laguna Verde, sin la manipulación de modelos matemáticos del reactor nuclear.

Primero, se desarrolló el sistema de control difuso, con la ayuda de un software llamado Modico, y en segundo lugar se acondicionó el programa obtenido del software, acoplándolo al simulador CM-PRESTO, para conformar un todo.

El control difuso fue generado utilizando, en el proceso de difuzificación, la inferencia denominada implicación mínimo de Mamdani y como desdifuzificación se empleó el método centro de masa o centroide.

Al proponer los conjuntos difusos, se hizo referencia a la opinión del experto del sistema, ya que él tenía el conocimiento de la experiencia, conduciendo al control difuso de manera más pertinente y rápida. Aunque, después de la propuesta de los conjuntos, el control es sometido a un arduo proceso de afinamiento.

Los cambios realizados en la etapa llamada afinamiento de los conjuntos difusos, modificó de manera determinante los movimientos suaves de la respuesta del control difuso. Estos afinamientos fueron innumerables pruebas en el software utilizado, pero siempre estuvieron apegados a las puntualizaciones del experto del sistema reactor nuclear.

En la parte de acondicionamiento, se prestó atención a las disposiciones del simulador, por un lado, a la opción escogida del comportamiento del simulador CM-PRESTO, es decir, si el simulador iba a registrar un núcleo completo sin restricciones de simetría, un cuarto, medio o un octavo del núcleo con simetría de reflexión, y por otro lado, a la distribución de las barras dentro del núcleo del reactor nuclear.

La etapa de acondicionamiento, es de las más importantes del diseño, ya que, sin un buen acondicionamiento, el control no podrá ser interpretado de manera coherente al sistema en cuestión. Y en esta etapa, es donde se considera, los límites en base a las especificaciones técnicas del reactor nuclear, siendo este reactor el de Laguna Verde, es decir, los valores del factor de multiplicación k , los márgenes de potencia y los límites del flujo de recirculación no permitidos.

También se observó que a pesar del patrón de inicio, la secuencia de control más coherente encontrada fue: barras-flujo, explicándose el porqué en el capítulo tercero.

Se advierte que para iniciar -si fuera el caso- con flujo de recirculación, se debe de considerar que el reactor tiene límites mínimo y máximo del valor que puede tomar el flujo, así que al considerar la mejor secuencia, se toma no nada más por los resultados del control, también se involucra la teoría que lleva atrás.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De esta manera y con base en los resultados obtenidos y presentados en el capítulo anterior, decimos que al diseñar y operar un control difuso, permitió un comportamiento imperativo con respuestas suaves y sistemáticas, esto se puede ver en las gráficas de respuesta en cada una de las pruebas realizadas, como comprobación del desempeño del sistema difuso.

Así se visualiza, que en ningún caso ocurre un sobresalto significativo que haya dado lugar a una mala respuesta, sino todo lo contrario, en todos los casos el comportamiento del factor de multiplicación k y de la potencia nodal relativa máxima $pnrm$, no sufren cambios bruscos, sino que todas sus variaciones son suaves, claras y moderadas.

Lo anterior confirma la validación del uso de un control difuso para el control de un sistema dado, en este caso, siendo un reactor nuclear como sistema a dominar, se comprobó la no necesidad de involucrarse con los modelos matemáticos y sí referirse a las personas que conocen el sistema, que en este caso fue el experto en reactores nucleares BWR's. Y con esto, fundir la estructura de control con la experiencia del conocedor en el ámbito práctico.

Entonces, las herramientas principales utilizadas en este proyecto fueron, la lógica difusa y el conocer el sistema por medio de la participación de un experto en reactores nucleares, y el resultado muestra no sólo un control definido, sino el resultado produce respuestas certeras que involucran la experiencia convertida en reglas difusas.

Con todo lo anterior, se demuestra la factibilidad de trabajar con la lógica difusa como una opción de control de sistemas, ya que en ella no sólo se pueden dominar sistemas complejos, sino que también se pueden utilizar diferentes teorías de control, esto es, se pueden mezclar controles según las necesidades del sistema.

Sin lugar a dudas, la lógica difusa tiene un vasto campo de trabajo, y el control difuso, tiene metodologías que nos ayudan a encontrar mejores respuestas y creadas automáticamente, un ejemplo que me llega a la mente, es el uso de redes neuronales, y son estas redes neuronales el paso siguiente a trabajos futuros de la tesis presentada en este escrito.

Cabe mencionar que el simulador presenta una limitante observable, ya que, lo que tenemos es un control difuso estático, el dinamismo ausente en el sistema provoca que las pruebas no tengan un hilo conductor que las relacione de manera única.

Si el simulador tuviera un comportamiento cíclico, entonces, una vez que el reactor nuclear llegó al estado de criticidad, su estado actual no permanecerá constante de manera indefinida, ya que existe una demanda de energía de la planta nucleoelectrónica que producirá cambios en los patrones, modificándose nuevamente el estado del factor de multiplicación k y de la potencia nodal relativa máxima $pnrm$, dando así un nuevo registro de las variables medibles que entrarán nuevamente al control difuso y este volverá a mover las barras y el flujo dependiendo las necesidades del sistema y este proceso seguirá sucesivamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Este obstáculo es también parte del problema planteado para un trabajo futuro, es decir, la proyección de este trabajo deberá conceder dinamismo al sistema y con las redes neuronales pueda modificar o afinar automáticamente sus propios conjuntos difusos.

Reconozcamos entonces, la importancia de ver un sistema a través de una gran gama de matices que puedan traducir de forma ordenada, natural y simple los fenómenos que lo conforman.

Los matices a que hago referencia son conocidos por el experto que se consulta, esto es, el experto es la persona indicada que puede ver la variedad de formas de describir el sistema y será esa persona y la lógica difusa la que den la pauta para modelar de manera eficaz un sistema.

Las alternativas de plantear el problema a una lógica difusa, pueden variar de muchas maneras, a mi parecer las partes más importantes a considerar serán la experiencia que sea utilizada y las metodologías que se emplean para proponer los conjuntos difusos.

Recuérdese que la lógica difusa ve más allá que la lógica aristotélica, esto es, la lógica aristotélica es un subconjunto de la lógica difusa, por lo consiguiente, esta última muestra la realidad tal como es, siempre y cuando se conozca al sistema de manera natural.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Bibliografía.

[C1], Comisión Federal de Electricidad.

Folleto,

¿Qué es la central nucleoelectrica de laguna verde?

Central nucleoelectrica de lagun verde

Alto Lucero, Veracruz

México.

[C2], Comisión Federal de Electricidad.

Folleto,

¿Qué es una central nuclear?

Departamente de Comunicación Social

Atoyac 97, 3er. Piso,

Impresora de ediciones S.A.

México.

[C3], Comisión Federal de Electricidad.

Folleto,

Del fuego a la Energía Nuclear

México, 1997

[GE1], GENERAL ELECTRIC, Co.

NEDO-24810

VOLUMEN 1, CHAPTER 4

CORE POWER RESPONSE

[H1], Hansen D.

Curso de Orientación Nuclear

Conferencia No. 4

Planta de Potencia del Reactor de Agua Hirviente (BWR)

Sistema de Salvaguarda del Reactor de Agua Hirviente (BWR)

Comisión Federal de Electricidad.

Enero de 1979

[I1], Lin Chin-Teng and C.S. George Lee

Neural Fuzzy Systems

A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems

PTR Prentice Hall

1996, EUA

[I2], Islas Vergara María Virginia y

Reyes Delgado Felipe Eleazar

Tesis

Desarrollo de una metodología para la

Evaluación física y económica de multiciclos

Para la administración de combustible

de reactores tipo BWR.

Facultad de Ciencias Químicas

Universidad de Veracruz

Poza Rica, Veracruz, 1994.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

[K1], Kosko Bart
Pensamiento Borroso
La nueva ciencia de la lógica borrosa
Drakontos
1995, Barcelona

[M1] Mohammad Jashidi, et al.
Fuzzy Logic and Control
Software and Hardware Applications
PTR Prentice Hall
1993, EUA

[M2]
Software Modico
Fuzzle Application version 3.0
<http://www.modico.com>
Copyright 1995

[S1], Shaw S. Ian
Fuzzy Control of Industrial Systems
Theory and applications
Kluver Academic Publishers
1998, EUA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO

Pruebas independientes de los controles difusos.

A continuación se muestran pruebas independientes de los controles desarrollados para mostrar su funcionamiento aislado del sistema reactor nuclear.

Se especifican datos de entrada tomando a una variable de entrada como constante, mientras que la otra variable incrementa su valor.

Vea las gráficas que acompañan a los resultados, se puede observar una respuesta bastante lineal sin cambios bruscos.

La corrida número 1 toma a k como constante valiendo 1.00 (valor crítico), para la corrida número 2 la constante es ahora pnm con valor de 2.25 y por último, la corrida número 3 toma el valor de k y de pnm variables como lo muestra la tabla siguiente:

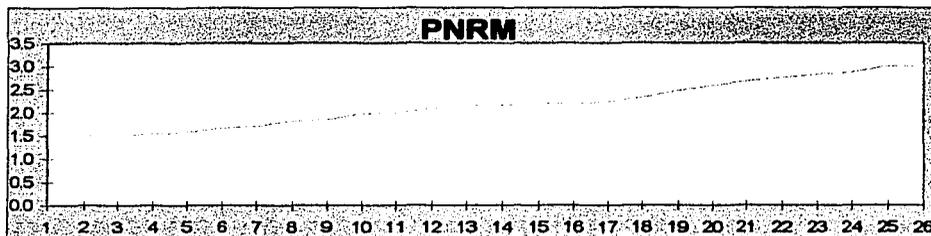
Entradas: k, pnm

Salidas: bcp, bcs

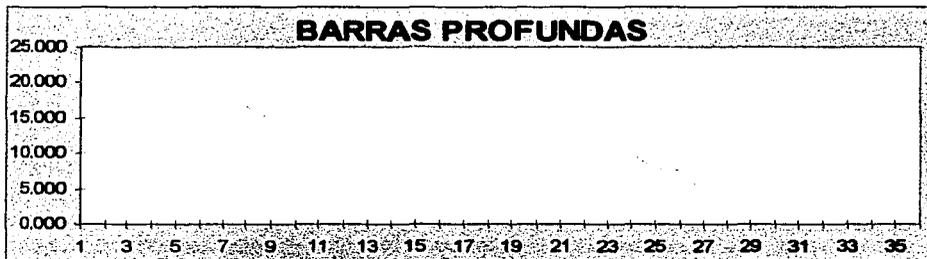
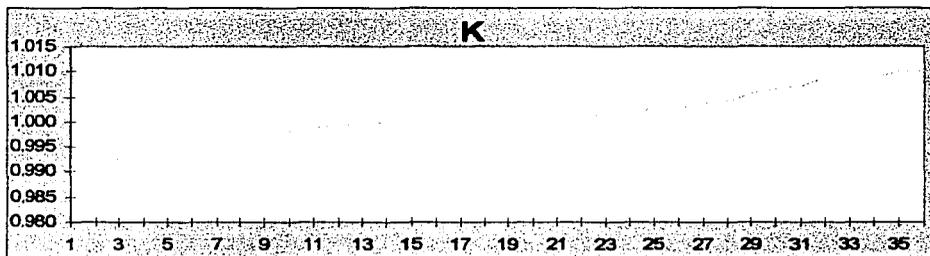
Corrida1 k=1.00, --> bcp=12.00		corrida2 pnm=2.25 --> bcs=12.00		corrida3			
pnm	bcs	k	bcp	k	bcp	pnm	bcs
1.501	20.04	0.99046	20.03	1.00000	12.00	2.26	11.77
1.511	20.04	0.99132	19.96	0.99140	19.95	1.59	19.98
1.528	20.03	0.99283	19.74	0.99380	19.55	1.62	19.94
1.551	20.02	0.99460	19.38	0.99520	19.23	1.85	18.65
1.589	19.98	0.99680	18.81	0.99750	15.94	1.98	16.16
1.682	19.83	0.99730	16.81	0.99960	12.00	1.99	16.01
1.720	19.75	0.99830	13.88	1.00190	9.82	2.28	11.35
1.830	19.20	0.99934	12.24	1.00570	4.35	2.29	11.16
1.860	18.40	0.99951	12.00	1.00830	3.91	2.56	7.35
1.992	15.98	1.00023	12.00	1.00990	3.80	2.91	4.02
2.010	15.72	1.00044	11.80	0.99770	15.27	2.99	3.96
2.100	14.50	1.00072	11.41	0.99730	16.81	2.46	8.74
2.158	13.69	1.00100	11.05	0.99690	18.78	2.09	14.64
2.180	13.35	1.00126	10.71	0.99500	19.28	2.59	6.86
2.200	13.02	1.00130	10.66	0.99300	19.71	2.91	4.02
2.220	12.65	1.00169	10.13	0.99060	20.02	2.97	3.97
2.250	12.00	1.00281	8.05	1.00980	3.80	2.99	3.96
2.340	10.34	1.00296	7.63				
2.490	8.34	1.00380	4.79				
2.590	6.86	1.00428	4.67				
2.680	5.00	1.00580	4.33				
2.763	4.29	1.00732	4.05				
2.835	4.14	1.00850	3.89				
2.885	4.06	1.00899	3.84				
3.000	3.96	1.00900	3.84				
3.000	3.96	1.00995	3.80				

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CORRIDA No. 1

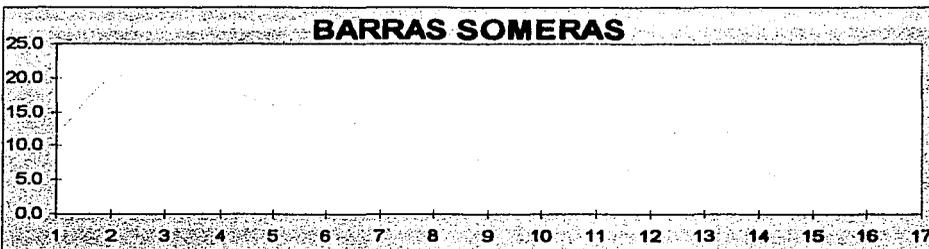
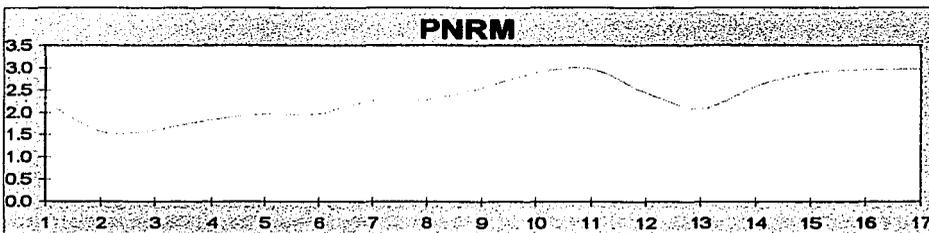
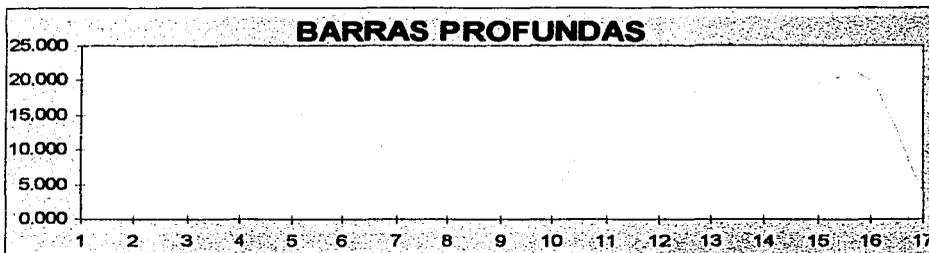
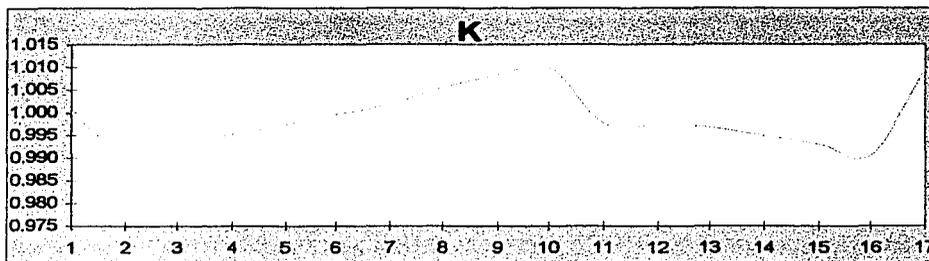


CORRIDA No. 2



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CORRIAD No. 3



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Los resultados anteriores se obtuvieron mediante el programa FUZZLE 3.0, el cual realiza toda la lógica difusa para darnos una salida que corresponda a la estructura que desarrollamos.

Así con este programa podemos ir afinando conjuntos difusos de tal manera que las respuestas cada vez se acerquen a la linealidad, ya que FUZZLE 3.0 tiene una opción que nos da la posibilidad de ingresar una serie de valores de entrada y como proceso consecuente se pueden visualizar los datos de entrada y salida en gráficas bidimensionales.

Las opciones que brinda el programa FUZZLE 3.0, además de desarrollar todo lo anterior, es la posibilidad de crear el código de los controles difusos en un lenguaje de programación, de esta manera, extraemos el control difuso para insertarlo en el sistema reactor nuclear. Las alternativas a escoger para crear el código son las siguientes: Ansi C, Visual C++, Fortran, Cobol, etc. El código a seleccionar es el lenguaje que nos ayude a unir el control difuso con el sistema a controlar. En nuestro caso la selección fue para Ansi C, con esto ubicamos el control difuso por medio de un lenguaje de programación y lo que resta es buscar la manera de adaptar ese programa para su mejor inserción en el sistema a controlar.