



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

SISTEMA EXPERTO EN LA TOMA DE DECISIONES DE UN
ESCENARIO DE RIESGO: LOCA PEQUEÑO EN UNA PLANTA
NUCLEOELÉCTRICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA
(COMPUTACIÓN)**

P R E S E N T A:

MARTHA MORA TORRES

**DIRECTOR DE TESIS: ANA LILIA CONCEPCIÓN LAUREANO
CRUCES**

México, D. F.

2007.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

ÍNDICE

Índice	<i>i</i>
Índice de Figuras	<i>v</i>
Índice de Tablas	<i>vii</i>
Resumen	<i>xi</i>
Introducción	<i>xiii</i>

Capítulo 1

EL SISTEMA EXPERTO Y LA TOMA DE DECISIÓN

INTRODUCCIÓN	2
1.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA EXPERTO	2
1.1.1 Base de conocimiento	2
1.1.2 Máquina de inferencia	3
1.1.3 Base de datos	3
1.2 USOS	4
1.3 CONTROL INTELIGENTE	4
1.4 TOMA DE DECISIONES	5
1.5 CASO DE ESTUDIO	5
1.6 TRABAJOS RELACIONADOS	8
1.7 SISTEMA PROPUESTO	10

Capítulo 2

LA REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO, EL RAZONAMIENTO Y LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

INTRODUCCIÓN	14
2.1 REPRESENTACIÓN Y RAZONAMIENTO	17
2.1.1 TIPOS DE BÚSQUEDA	17
2.2 TÉCNICAS DE REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO	19
2.2.1 REGLAS DE PRODUCCIÓN	21
2.2.2 REDES SEMÁNTICAS	21
2.2.3 MARCOS	21
2.2.4 GUIONES	22
2.2.5 LÓGICA DE PREDICADOS	24
2.3 CONCLUSIONES	24

Capítulo 3

EL RAZONAMIENTO Y LA TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE

Procesamiento Distribuido y Paralelo, y los Mapas Cognoscitivos Difusos

INTRODUCCIÓN	28
3.1 TÉCNICAS PARA EL MANEJO DE LA INCERTIDUMBRE	28
3.2 MAPAS COGNOSCITIVOS DIFUSOS	34
3.2.1 Razonamiento y álgebra causal	42
3.2.2 Función umbral	43

Capítulo 4

FALLAS DE RIESGO Y GUIA DE PROCEDIMIENTOS EN EMERGENCIA EN UNA PLANTA NUCLEOELÉCTRICA

INTRODUCCIÓN	48
4.1 ACCIDENTE POR PÉRDIDA DE REFRIGERANTE: LOCA PEQUEÑO	48
4.2 PROCEDIMIENTOS EN EMERGENCIA	49
4.3 SISTEMAS AUXILIARES HPCS Y LPCS	51
4.3.1 Sistema de enfriamiento del núcleo a alta presión HPCS	51
4.3.2 Sistema de enfriamiento del núcleo a baja presión LPCS (V2)	52
4.4 SISTEMAS QUE INTERVIENEN EN EL ESCENARIO LOCA PEQUEÑO	53
4.4.1 Sistema aislado de enfriamiento del núcleo del reactor RCIC	53
4.4.2 Condensador (V1)	54
4.4.3 Válvula de alivio (P) y Válvula manual para tener disponibilidad del condensador (01)	54
4.4.4 Despresurizador (X1)	54
4.4.5 Sistema eliminador de calor residual RHR (W)	54
4.4.6 Venteo (Y) y Fuga (R)	55

Capítulo 5

REPRESENTACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES EXPERTA FRENTE AL ESCENARIO LOCA PEQUEÑO

INTRODUCCIÓN	58
5.1 JUSTIFICACIÓN	59
5.2 OBJETIVOS	60

5.3	METODOLOGÍA	60
5.4	IDENTIFICACIÓN DEL DOMINIO Y ALCANCE	61
5.5	COMPRENSIÓN DEL PROBLEMA	61
5.6	REPRESENTACIÓN: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO USANDO MCDS	62
5.6.1	Análisis cognoscitivo de tareas (ACT)	62
5.6.2	Identificación de los nodos del modelo cognoscitivo	78
5.6.3	Establecimiento de relaciones entre los nodos	81
5.6.4	Mapa cognoscitivo difuso y matriz de relaciones	89
5.6.5	Simulaciones y discusión de resultados	93
5.6.6	Conclusiones del análisis, pruebas y resultados	108
	Conclusiones	109
	Dificultades	111
	Trabajos Futuros	113
	Referencias	115
	Apéndice	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

EL SISTEMA EXPERTO Y LA TOMA DE DECISIÓN

Fig. 1.1	Arquitectura básica de un sistema experto	2
Fig. 1.2	Árbol de Eventos para LOCA (<i>Loss Of Coolant Accident</i>) Pequeño (Pág. 1 de 7).	6
Fig. 1.3	Esquema binomial del árbol de eventos LOCA pequeño	7
Fig. 1.4	Árbol de fallas del sistema RCIC por sus siglas en inglés <i>Reactor Core Isolation Cooling System</i>	8

Capítulo 2

LA REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO, EL RAZONAMIENTO Y LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Fig. 2.1	Los estados mentales de la cognición y sus relaciones	14
Fig. 2.2	Estado de percepción con respecto a un gato en una memoria semántica	15
Fig. 2.3	Estado de percepción	15
Fig. 2.4	Árbol de búsqueda a lo ancho	17
Fig. 2.5	Árbol de búsqueda en profundidad	18
Fig. 2.6	Red Semántica	21
Fig. 2.7	Sistemas dinámicos que constituyen el medio ambiente y el gente autónomo	22
Fig. 2.8	Guión de una sala de examinación escolar	23

Capítulo 3

EL RAZONAMIENTO Y LA TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE

Procesamiento Distribuido y Paralelo, y los Mapas Cognoscitivos Difusos

Fig. 3.1	El espacio de la hipótesis y la evidencia	29
Fig. 3.2	El intervalo de creencia	31
Fig. 3.3	Conjunto convencional	32
Fig. 3.4	Conjunto difuso	33
Fig. 3.5	Sistema difuso que relaciona $\mu_{Pérdidaparciamemoria}(\text{Porcentaje} = P_k)$ con $\mu_{Anciano}(\text{Edad} = E_j)$	33
Fig. 3.6	Mapa Cognoscitivo que describe las relaciones políticas de la	39

	paz en Medio Oriente	
Fig. 3.7	Mapa cognoscitivo con etiquetas difusas en los arcos	40
Fig. 3.8	Relación causal negativa	43
Fig. 3.9	Relación causal positiva	43
Fig. 3.10	Función Logística	45
Fig. 3.11	Gráfica de $S(x)$ con diferentes valores de k	46

Capítulo 4

FALLAS DE RIESGO Y GUIA DE PROCEDIMIENTOS EN EMERGENCIA EN UNA PLANTA NUCLEOELÉCTRICA

Fig. 4.1a	Representación del alcance de la propuesta de análisis	48
Fig. 4.1b	Modelo mental generalizado del escenario LOCA pequeño	49
Fig. 4.2	Diagrama del Sistema HPCS	52
Fig. 4.3	Diagrama del Sistema LPCS	53

Capítulo 5

REPRESENTACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES EXPERTA FRENTE AL ESCENARIO LOCA PEQUEÑO

Fig. 5.1	Diagrama conceptual de análisis de seguridad y rendimiento del SMART	59
Fig. 5.2	Trayectorias del escenario LOCA pequeño	61
Fig. 5.3	Modelo mental del análisis de parámetros	67
Fig. 5.4	Modelo mental del sistema mitigante HPCS	67
Fig. 5.5a	Modelo mental del escenario LOCA pequeño: entrada y resultados	68
Fig. 5.5b	Modelo mental del escenario LOCA pequeño: trayectorias	69
Fig. 5.6	Diagrama conceptual del dominio de acuerdo al ACT	76
Fig. 5.7	Diagrama conductual	77
Fig. 5.8	Diagrama esquemático de un reactor BWR mostrando los elementos identificados como nodos	78
Fig. 5.9	Diagrama esquemático del Sistema HPCS	79
Fig. 5.10	Funcionamiento de una planta nucleoelectrica	80
Fig. 5.11	MCD del análisis de parámetros	90
Fig. 5.12	Mapa Cognoscitivo Difuso de un conjunto representativo del escenario LOCA pequeño	91
Fig. 5.13	MCD del escenario LOCA pequeño	92

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

EL SISTEMA EXPERTO Y LA TOMA DE DECISIÓN

- - -

Capítulo 2

LA REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO, EL RAZONAMIENTO Y LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

- - -

Capítulo 3

EL RAZONAMIENTO Y LA TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE

Procesamiento Distribuido y Paralelo, y los Mapas Cognoscitivos Difusos

Tabla 3.1	Matriz relacional	34
Tabla 3.2	Matriz relacional reducida	34
Tabla 3.3	Matriz de adyacencia E del MC de la Figura 3.6	38
Tabla 3.4	Matriz de adyacencia de un mapa cognoscitivo	41
Tabla 3.5	S(x) en función del valor de k	45

Capítulo 4

FALLAS DE RIESGO Y GUIA DE PROCEDIMIENTOS EN EMERGENCIA EN UNA PLANTA NUCLEOELÉCTRICA

- - -

Capítulo 5

REPRESENTACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES EXPERTA FRENTE AL ESCENARIO LOCA PEQUEÑO

Tabla 5.1	Especificación del ACT de la toma de decisiones experta en LOCA pequeño.	72
Tabla 5.2	Especificación del ACT de la toma de decisiones experta en el escenario LOCA pequeño de acuerdo al conocimiento conceptual.	73
Tabla 5.3	Especificación del ACT la toma de decisiones experta en el escenario LOCA pequeño de acuerdo a las habilidades necesarias.	74
Tabla 5.4	Especificación del ACT la toma de decisiones experta en el escenario LOCA pequeño de acuerdo a las habilidades necesarias (1ra iteración).	74
Tabla 5.5	Nodos identificados del modelo mental: Análisis de parámetros	78
Tabla 5.6	Nodos del sistema HPCS	79
Tabla 5.7	Nodos identificados en el modelo mental: elementos mitigantes de LOCA pequeño	80
Tabla 5.8	Relaciones encontradas en las acciones de las GPE	83
Tabla 5.9	Relaciones de causalidad entre los nodos del sistema HPCS	85
Tabla 5.10	Tabla de efectos entre elementos del escenario LOCA pequeño.	87
Tabla 5.11	Relaciones encontradas a partir de la Tabla de efectos 5.10	88
Tabla 5.12	Relaciones de causalidad entre los nodos del escenario LOCA pequeño	89
Tabla 5.13	Matriz de relaciones de causalidad de las acciones de la GPE	90
Tabla 5.14	Matriz de relaciones de causalidad en el sistema HPCS	91
Tabla 5.15	Matriz de relaciones de causalidad bajo el escenario LOCA pequeño	92
Tabla 5.16	Resultados de la prueba 1 del análisis de parámetros	93
Tabla 5.17	Resultados de la prueba 2 del análisis de parámetros	94

Tabla 5.18	Resultados de la prueba 3 del análisis de parámetros	95
Tabla 5.19	Resultados de la prueba 4 del análisis de parámetros	95
Tabla 5.20	Resultados de la prueba 5 del análisis de parámetros	96
Tabla 5.21	Resultados de la prueba 6 del análisis de parámetros	97
Tabla 5.22	Resultados de la prueba 7 del análisis de parámetros	97
Tabla 5.23	Resultados de prueba 1 del estado del sistema HPCS	98
Tabla 5.24	Resultados de la prueba 2 del estado del sistema HPCS	98
Tabla 5.25	Resultado de la prueba 3 del estado del sistema HPCS	99
Tabla 5.26	Resultados de la prueba 4 del estado del sistema HPCS	99
Tabla 5.27	Resultados de la prueba. 5 del estado del sistema HPCS	100
Tabla 5.28	Resultados de la prueba 1 del escenario LOCA pequeño	101
Tabla 5.29	Resultados de la prueba 2 del escenario LOCA pequeño	102
Tabla 5.30	Resultados de la prueba 3 del escenario LOCA pequeño	103
Tabla 5.31	Resultados de la prueba 4 del escenario LOCA pequeño	104
Tabla 5.32	Resultados de la prueba 5 del escenario LOCA pequeño	105
Tabla 5.33	Resultados de la prueba 6 del escenario LOCA pequeño	106
Tabla 5.34	Resultados de la prueba 7 del escenario LOCA pequeño	107

Resumen

En una planta nuclear, de manera general, el proceso de supervisión consiste en mantener en todo momento las condiciones normales de presión y temperatura para el funcionamiento del núcleo, debido a lo anterior el evento de pérdida del refrigerante destinado a mantener la temperatura dentro del rango de funcionamiento normal (Small Loss Of Coolant Accident) es uno de los eventos considerado como falla grave y por lo tanto, importante analizar. Actualmente, el análisis se lleva a cabo mediante la metodología de Bayes (si tal evento entonces/ si no hay evento entonces). Nuestra propuesta fue crear un sistema experto auxiliar en la automatización de la toma de decisiones dado el evento inicial, que deriva en escenarios futuros. La toma de decisiones del supervisor está destinada a tratar de mitigar los efectos de falla dentro del dominio de una planta nuclear.

La representación del conocimiento y el razonamiento forman parte fundamental del diseño del sistema experto. En el caso de estudio, el mundo real está representado por los distintos eventos que se pueden manifestar en la operación de la planta nuclear. Dichos eventos se caracterizan por un conjunto de elementos interrelacionados a través del razonamiento experto. Hemos elegido los mapas cognoscitivos difusos (MCD) para la representación del razonamiento experto frente a un evento de falla, debido a que éstos, logran manejar la incertidumbre en la toma de decisiones, a través de la interrelación de sus elementos, además de potenciar el razonamiento distribuido.

Como primer paso se detectó a través de un análisis conductual los elementos que generan la conducta experta y el proceso de esa conducta. Los elementos están representados por los nodos y la conducta es representada a través de los enlaces entre estos nodos. Identificar los elementos necesarios requirió de horas de trabajo conjunto con el experto para entender el proceso de supervisión pero aún más tiempo requirió identificar las relaciones y el grado de causalidad entre ellos.

Los elementos detectados como parte del modelo conductual se tomaron en cuenta basándose en el reporte elaborado por la Unidad 1 de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde y en la experticia de los expertos humanos consultados, siendo uno de ellos, uno de los autores de dicho reporte y la guía de los procedimientos en emergencia.

El análisis conductual incluye tres aspectos de la supervisión: 1) el estado de los parámetros físicos como presión, temperatura, potencia y nivel de agua; 2) el estado de los mecanismos de mitigación de fallas y del núcleo; y 3) el estado del sistema HPCS. De este análisis, se obtienen tres mapas cognoscitivos: uno por cada aspecto analizado con su correspondiente matriz de relaciones causales.

El estado futuro de los parámetros físicos se logra interpretando la matriz correspondiente. Con este resultado, el supervisor es capaz de tomar una acción anticipada, tomando como base los procedimientos en emergencia existentes. Dichos procedimientos indican el uso de los mecanismos adecuados de mitigación; por ello, fue importante incluir este aspecto en el análisis. A partir de estos resultados se realiza la interpretación de la matriz correspondiente a los mecanismos de mitigación y, se obtiene como resultado, el estado futuro de los mismos. Dichos resultados permiten al supervisor, analizar si la acción tomada, es eficaz para prevenir un posible escenario de riesgo (estado futuro del núcleo).

El análisis realizado para obtener la conducta del experto es lo que proporciona al sistema el grado de aproximación en sus resultados, lo que conlleva la confiabilidad en la asistencia durante la toma de decisiones en situaciones de riesgo.

El reto futuro será implementar otros escenarios de riesgo dentro de una planta nuclear.

Introducción

La investigación de la inteligencia artificial se ha enfocado en las últimas décadas en el saber específico porque es ahí donde convergen la comprensión, la solución de problemas y demás funciones de la inteligencia. Lo anterior pone de manifiesto la importancia del experto en toda actividad humana, pues un experto es aquella persona que mediante los conocimientos adquiridos a través de la experiencia (experticia) resuelve problemas específicos. [17]. Buscar la automatización en la solución de problemas aprovechando la experticia de un experto humano siempre ha sido un punto de interés y de investigación para la ciencia y la ingeniería, por lo que dentro de las técnicas de la IA, son precisamente los llamados sistemas expertos los que cumplen con este propósito.

Todo proceso (del latín *processus*) dentro de la actividad humana, entendido como un conjunto de actividades o eventos que se realizan o suceden con un determinado fin, tiene implícito una toma de decisiones, la cual en situaciones de riesgo pueden generar un mayor número de accidentes graves. Dentro de una planta nuclear el proceso de supervisión de cada uno de los eventos que ocurren no son la excepción, la toma de decisiones para llevar a cabo acciones que mitiguen los efectos de fallas ocurridas se convierte en un problema complejo al tratar demasiada información en breves lapsos de tiempo, sin contar la tensión nerviosa a la que se somete el supervisor. Desde hace décadas la toma de decisiones se ha tratado de automatizar mediante sistemas expertos que utilizan el método de Bayes, sin embargo, este tipo de razonamiento automático se ve limitado cuando se trata de situaciones donde hace falta información, es decir, cuando existe incertidumbre. Por ello, es necesario tratarla con otra metodología como es la teoría de la posibilidad que consiste en la lógica difusa creada por Zadeh que pondera la vaguedad en la información, dándole grados de posibilidad a un evento determinado y cómo éste influye sobre otros que intervienen en el análisis del problema a resolver. Este método fue ampliamente explotado por los japoneses en procesos de control industrial, en diagnóstico, fotografía, entre otros [5, 19, 24].

En el **capítulo 1** se explica con más detalle lo que son los sistemas expertos, sus elementos y su relación con la toma de decisiones, además de describir algunos ejemplos de aplicación.

En una planta nuclear de manera general el proceso de supervisión consiste en mantener en todo momento las condiciones normales de funcionamiento del núcleo (presión y temperatura principalmente), por ello la pérdida del refrigerante destinado a mantener la temperatura dentro del rango de funcionamiento normal es uno de los eventos de falla graves que es importante

analizar. Actualmente, el análisis se lleva a cabo mediante la metodología de Bayes (SI tal evento ENTONCES; SI_NO hay evento ENTONCES). Nuestra propuesta es crear un sistema experto auxiliar en la automatización de la toma de decisiones que un supervisor debe llevar a cabo al tratar de mitigar los efectos de falla. Lo anterior dentro del dominio de una planta nuclear, específicamente, en el evento de falla debido a la pérdida de refrigerante denominado LOCA pequeño por sus siglas en inglés (Small Loss Of Coolant Accident). Por otro lado considerando los procedimientos de emergencia existentes, se pretende contar con un sistema experto que le proporcione al supervisor información sobre el estado futuro de los parámetros esenciales de la central, a partir del cambio de uno o más de ellos. Lo anterior, permite la posibilidad de una acción anticipada ante un posible escenario de emergencia. Esta última característica conlleva la posibilidad de que dicho sistema experto tenga un alto potencial para ser utilizado en el entrenamiento de los operadores de la planta.

La representación del conocimiento y el razonamiento forman parte fundamental del diseño del sistema experto. En el caso de estudio el mundo real, está representado por los distintos eventos que se pueden manifestar en la operación de la planta nuclear. Dichos eventos se caracterizan por un conjunto de elementos interrelacionados a través del razonamiento experto. Hemos elegido los mapas cognoscitivos difusos (MCD) para la representación del razonamiento experto frente a un evento de falla, debido a que éstos, logran manejar la incertidumbre en la toma de decisiones, a través de la interrelación de sus elementos.

El **capítulo 2**, por su parte, trata sobre la representación del conocimiento, los tipos de representación y el razonamiento.

Los mapas cognoscitivos difusos son digrafos utilizados para representar el razonamiento causal, además de potenciar una representación que permite el razonamiento distribuido paralelo. La parte difusa nos permite contar con grados de causalidad representados como enlaces entre los nodos de estos digrafos, conocidos también como conceptos. Esta estructura *permite la propagación de la causalidad hacia adelante y hacia atrás* permitiendo que la base de conocimiento aumente al aumentar nodos y enlaces entre ellos. La causalidad está representada como una relación difusa entre los nodos. Para este tipo de representación se ha desarrollado el álgebra causal que permite la implementación de este tipo de representación del conocimiento [1, 4-7, 14, 16, 18, 21, 22, 27, 31].

En el **capítulo 3** se ven con detalle los mapas cognoscitivos difusos realizándose una comparación entre la representación utilizada actualmente (capítulo 1) y la propuesta.

El **capítulo 4** describe el proceso de supervisión en una planta nuclear, específicamente, dentro del escenario de falla LOCA pequeño. Este escenario es abordado en la propuesta de solución al problema planteado sobre la toma de decisiones cuando se trata con demasiada información, en tan poco tiempo.

En el **capítulo 5** se desarrolla nuestra propuesta, realizando como primer paso, un análisis cognoscitivo de la conducta del experto. De este análisis se obtuvo el proceso de la conducta y los elementos que generan la conducta. Los elementos están representados por los nodos y la conducta es representada a través de los enlaces entre éstos.

Identificar los elementos necesarios requirió de horas de trabajo conjunto con el experto para entender el proceso de supervisión pero aún más tiempo requirió identificar las relaciones y el grado de causalidad entre ellos.

Los elementos detectados como parte del modelo se tomaron en cuenta basándose en la guía de procedimientos en emergencia [2], en el reporte elaborado por la Unidad 1 de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde [3] y en la experticia de los expertos consultados, siendo uno de ellos, coautor de dicho reporte.

El análisis cognoscitivo de la conducta del experto incluye tres aspectos de la supervisión: 1) el estado de los parámetros físicos como presión, temperatura, potencia y nivel de agua; 2) el estado de los mecanismos de mitigación de fallas y del núcleo; y 3) el estado del sistema

HPCS. De este análisis, se obtienen tres mapas cognoscitivos: uno por cada aspecto analizado y se genera su correspondiente matriz de relaciones causales.

Interpretando la matriz correspondiente a los parámetros físicos, se obtiene como resultado el estado futuro de los mismos. Con este resultado, el supervisor es capaz de tomar una acción anticipada tomando como base los procedimientos en emergencia existentes [2]. Dichos procedimientos indican el uso de los mecanismos adecuados de mitigación; por ello, fue importante incluir este aspecto en el análisis. A partir de estos resultados se realiza la interpretación de la matriz correspondiente a los mecanismos de mitigación y, se obtiene como resultado, el estado futuro de los mismos. Dichos resultados permiten al supervisor, analizar si la acción tomada, es eficaz para prevenir un posible escenario de riesgo (estado futuro del núcleo).

Finalmente se concluye que el análisis realizado para obtener la conducta del experto es lo que proporciona al sistema el grado de aproximación en sus resultados y por ello la confiabilidad en la asistencia en la toma de decisiones. De lo anterior se concluye que *el mayor reto estriba en lograr modelar la conducta del experto.*

Capítulo 1

EL SISTEMA EXPERTO Y LA TOMA DE DECISIÓN

El presente capítulo comprende los antecedentes que nos permiten contextualizar, el planteamiento del uso de mapas cognoscitivos difusos (MCDs), para representar el comportamiento de un experto humano, con el fin de modelar el razonamiento de un sistema experto, ubicando el dominio de éste en *fallas de riesgo* que pueden originar accidentes graves dentro de una planta nuclear.

Como parte central de los antecedentes se describen los componentes de un sistema experto (SE) el razonamiento en la toma de decisiones y sus aplicaciones. Se describen, además, el problema a resolver, los trabajos relacionados con el uso de los MCDs en la resolución de problemas similares y nuestra propuesta. Específicamente, la propuesta se hace sobre un escenario de falla denominado *accidente por pérdida de refrigerante originado por el evento inicial de una pequeña fuga de líquido refrigerante*.

INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) comprende un amplio horizonte de estudio, dentro del cual se incluyen varios tipos de representación del conocimiento, diferentes técnicas de búsqueda inteligente, varios métodos para resolver incertidumbre de datos y conocimiento y muchos otros aspectos.

Buscar la automatización en la solución de problemas aprovechando la experticia de un experto humano siempre ha sido un punto de interés y de investigación para la ciencia y la ingeniería, por lo que dentro de las técnicas de la IA, son precisamente los llamados SE los que cumplen con este propósito. Este concepto de sistema experto fue introducido en una conferencia sobre Inteligencia Artificial en 1977 por Feigenbaum. Un sistema experto no es más que un software que emula el comportamiento del experto humano en la solución de problemas [14, 28].

1.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA EXPERTO

Desde el punto de vista estructural, un sistema experto se conforma básicamente de los siguientes componentes: una base del conocimiento, una base de datos y una máquina de inferencia, como se muestra en la figura 1.1. Si hablamos más específicamente, también podemos agregar los componentes que intervienen en la intercomunicación entre los componentes básicos antes mencionados. Estos componentes son sus interfaces. Además de considerar, la interfaz entre el sistema y el usuario.

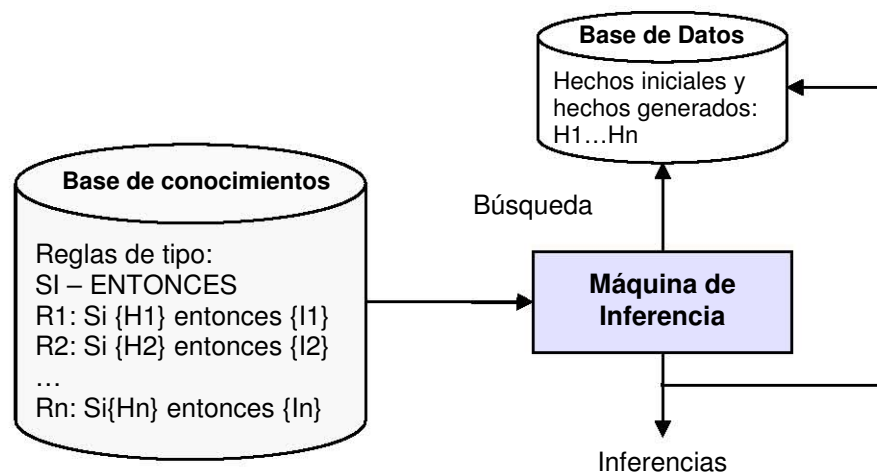


Fig. 1.1. Arquitectura básica de un sistema experto

1.1.1 Base de conocimiento

La base de conocimientos contiene el conocimiento específico de la disciplina de la cual el sistema es experto, es decir, las reglas y procedimientos del dominio de aplicación importantes para la solución de problemas.

Esta base consiste de reglas programadas del tipo:

SI premisa ENTONCES consecuencia/acción

Las premisas son proposiciones que se refieren a vinculaciones lógicas referentes a cualidades de los objetos, a partir de las cuales se llega a conclusiones. En la

conclusión se adicionan nuevos hechos y cualidades a la base de conocimiento y/o se ejecutan acciones [29].

1.1.2 Máquina de inferencia

En un sistema experto la máquina de inferencia es la parte central del mismo debido a que interpreta la base de conocimiento usando los datos provenientes del entorno y que son alimentados a la base de datos.

Además, permite controlar el sistema ya que es aquí donde se manejan las reglas contenidas en la base de conocimiento.

La máquina lleva a cabo el razonamiento, es decir, relaciona el conocimiento en función de los hechos (datos) y genera nuevos hechos en función de los procesos que se van dando. Un hecho es una condición verdadera, en otras palabras que está presente.

Para una mayor eficiencia del sistema experto, es necesario implementar estrategias de razonamiento, las cuales indican la dirección del mismo. Así tenemos el encadenamiento hacia adelante y el encadenamiento hacia atrás. También existe un razonamiento híbrido que involucra ambas direcciones. La dirección se elige dependiendo de la naturaleza del problema a resolver, esto es si se parten de hechos o de hipótesis. Debido a ello, al encadenamiento hacia adelante también se le conoce como *razonamiento controlado por hechos* y al encadenamiento hacia atrás como *razonamiento controlado por hipótesis*.

El encadenamiento, representa el control de acceso de la representación del conocimiento, y no es más que el disparo ordenado de las reglas una vez que determinados hechos o hipótesis son dados, es decir, la máquina de inferencia será la que consulte constantemente la base de datos y la base del conocimiento de manera tal que teniendo en cuenta los datos o las hipótesis en cuestión verifica si son suficientes para satisfacer una o más reglas contenidas en la base de conocimiento, de ser así, la regla es “disparada”, dando origen a nuevos datos que serán tomados en cuenta para ir encadenando las inferencias hasta llegar a una solución, es por ello que este proceso es eminentemente recursivo.

Resumiendo, las funciones del motor de inferencia son [29]:

1. Determinación de las acciones que tendrán lugar, el orden en que lo harán y como lo harán entre las diferentes partes del sistema experto.
2. Determinar cómo y cuándo se procesarán las reglas y que reglas deberán procesarse.
3. Control del diálogo con el usuario.

Debido a que el motor de inferencia es una unidad lógica, debemos decir que la lógica es una herramienta valiosa cuyo poder analítico nos permite profundizar en los resultados del análisis cognoscitivo de tareas con el máximo rigor y facilidad [19].

1.1.3 Base de datos

La base de datos es dinámica. Aquí se almacenan los hechos iniciales, los generados por las hipótesis y resultados intermedios. Es una memoria temporal o de trabajo donde el motor de inferencia almacena las conclusiones temporales que va obteniendo y donde busca las premisas que le permiten obtener otras nuevas. El contenido por tanto de la base de afirmaciones es diferente en cada consulta que se lleva a cabo.

1.2 USOS

Según Hayes-Roth (1983) [28], hay diferentes tipos de sistemas expertos, de acuerdo a su propósito o a su función y en general son los siguientes:

- **SE de interpretación:** Infiere descripciones de situaciones a través de sensores de datos. Se utiliza en diversas clases de análisis inteligente (estructuras químicas, análisis de imágenes, señales, lenguaje).
- **SE de predicción:** realiza pronósticos militares, del clima, predicciones demográficas o de tránsito. El sistema emplea un modelo dinámico con valores de parámetros ajustados a una situación dada.
- **SE de diagnóstico:** infiere un mal funcionamiento de un sistema por observación, ejemplos de este tipo de sistema son los de diagnóstico médico, electrónico, mecánico o de programación. Establecen una relación entre un mal comportamiento y sus posibles causas.
- **SE de diseño:** configura objetos bajo restricciones, ejemplos claros lo son el diseño de circuitos impresos, de construcciones de distintos tipos de objetos, problemas de costos.
- **SE de planeación:** diseña acciones específicas en problemas de diseño; por ejemplo en la programación automática de robots, proyectiles, rutas, comunicaciones, experimentos y de planeación militar.
- **SE de monitorización:** observa cada paso de un plan tratando de garantizar su éxito, para ello busca e identifica los puntos vulnerables del mismo.
- **SE de depuración:** sugiere el remedio a problemas diagnosticados, para ello se vale de la planeación, diseño y predicción.
- **SE de reparación:** ejecuta el plan para corregir un problema diagnosticado, para ello se vale de la depuración, planeación y ejecución.
- **SE de instrucción:** diagnostica y depura el comportamiento de estudiantes, diagnosticando las debilidades en su conocimiento e identificando el remedio adecuado definiendo un tutorial que interactúe con el estudiante para cubrir sus necesidades.
- **SE de control:** interpreta, predice, repara y desarrolla el proceso de monitorización para el comportamiento de sistemas. Ejemplo de sus aplicaciones es su uso en el control de tráfico aéreo, control de misiles y de procesos industriales, entre otros.
- **SE de instrucción inteligente asistida por computadora:** Capacita al usuario para resolver problemas, por ejemplo, los programas de computadora que ayudan a una persona a aprender un idioma. [18, 20]

1.3 CONTROL INTELIGENTE

Dentro del área de control, existe el denominado control inteligente, el cual, se diferencia del control normal por la dinámica del sistema a controlar. Dentro del control tradicional la dinámica es completamente conocida, en cambio, el control inteligente se presenta cuando la dinámica de la planta no es completamente conocida y se recomienda entonces el control basado en reglas del tipo SI Premisa ENTONCES Consecuencia/Acción. En dicho control, la regla elegida para dispararse es aquella cuya premisa coincida con la respuesta dinámica a los parámetros de la planta [14].

En situaciones donde la premisa no coincide exactamente con la respuesta de la planta, es utilizada la lógica difusa porque tiene la capacidad para coincidir la premisa parcialmente/aproximadamente con la respuesta dinámica de la planta.

El control difuso ha sido usado exitosamente en muchas plantas industriales, una típica aplicación es el control de potencia en un reactor nuclear.

Dentro de esta área también se cuenta con el control adaptativo, basado en la corriente reactiva y desarrollado con arquitecturas multiagente. Dicho control consiste en dotar al sistema de la capacidad de adaptarse a las condiciones dinámicas del entorno, lo anterior implica que el sistema es tolerante a fallas y de esta forma se mantiene al sistema estable y funcionando [34, 35]

1.4 TOMA DE DECISIONES

Desde hace décadas la toma de decisiones, ha sido un objeto de estudio de la IA [37, 39] y se ha tratado de automatizar mediante sistemas expertos que utilizan reglas del tipo SI – ENTONCES, sin embargo este tipo de razonamiento automático se ve limitado cuando se enfrenta a situaciones donde hace falta información, es decir, el proceso de toma de decisiones bajo incertidumbre precisa de un mejor método para manejar dicha incertidumbre en condiciones de riesgo de acuerdo a la naturaleza del problema. En el *capítulo 3*, se describen los mejores métodos para manejar la incertidumbre y específicamente el utilizado para resolver el problema que se plantea a continuación.

1.5 CASO DE ESTUDIO

En una planta nuclear, el proceso de supervisión se torna aún más complejo por la enorme cantidad de información, proveniente de las lecturas del estado de los distintos dispositivos. Esta información se debe tomar en cuenta para tomar una decisión que mantenga el funcionamiento normal de la planta. Además, el trabajo de un supervisor se ve sometido a la presión que significa entrar en situaciones de riesgo cuando se presentan fallas o lecturas fuera del rango normal de operación del reactor, donde estos efectos podrían desencadenar un accidente grave. Lo anterior más la incertidumbre del momento en que se puedan presentar las fallas, generan la atención por parte de la inteligencia artificial. Actualmente, la metodología que han utilizado para el análisis y toma de decisiones es binomial, dando origen a innumerables árboles para representar la supervisión que se debe seguir en los diferentes sistemas de control. Un ejemplo es cuando se presenta el accidente por una pequeña fuga de refrigerante (LOCA Pequeño por sus siglas en inglés *Loss Of Coolant Accident*) Figura 1.2 [12]

LOCA PEQUEÑO	SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR	SISTEMA SUPRESIÓN DE VAPOR	HPCS	RCIC	DESPRE	SISTEMA DE CONDENSADOS	LPCS	LPCI	NÚMERO DE SECUENCIA	RESULTADO DE LAS SECUENCIAS
S2	C	SV	U1	U2	X1	V1	V2	V3		
									S2-1 a S2-28	Transferir a pag 2 al punto (A)
									S2-29 a S2-98	Transferir a pag 3 al punto (B)
									S2-99 a S2-118	Transferir a pag 5 al punto (D)
									S2-119 a S2-138	Transferir a pag 6 al punto (E)
									S2-139 a S2-158	Transferir a pag 7 al punto (F)
									S2-159 a S2-167	Transferir a pag 7 al punto (G)
									S2-168	Núcleo dañado Contención Vulnerable

Fig. 1.2. Árbol de Eventos para LOCA (*Loss Of Coolant Accident*) Pequeño (Pág. 1 de 7).

Lo que se traduce en el siguiente esquema binomial representado en la Figura 1.3:

```

SI (S2=verdadero) ENTONCES
  SI (C=verdadero) ENTONCES
    SI (SV=verdadero) ENTONCES
      SI (U1= Verdadero) ENTONCES
        S2-1 a S2-28 Transferir a pag. 2 al punto (A)
      SiNo
        SI (U2=verdadero) ENTONCES
          S2-29 a S2-98 Transferir a pag. 3 al punto (B)
        SiNo
          SI (X1= verdadero) ENTONCES
            SI (V1= verdadero) ENTONCES
              S2-99 a S2-118 Trans. a pag. 5 al punto (D)
            SiNo
              SI (V2= verdadero) ENTONCES
                S2-119 a S2-138 Trans. a pag. 6 a (E)
              SiNo
                SI (V3= verdadero) ENTONCES
                  S2-139 a S2-158 Trans. a pag. 7 a (F)
                SiNo
                  S2-159 a S2-167 Trans. a pag. 7 a (G)
            SiNo
              S2-168 NúcleoDañado, ContenciónVulnerable
          SiNo
            No desarrollado
        SiNo
          No desarrollado
    SiNo
      Fuera de escenario LOCA Pequeño
  
```

Fig. 1.3. Esquema binomial del árbol de eventos LOCA pequeño

De esa manera el árbol va creciendo conforme avanza el proceso y en consecuencia se van anidando soluciones locales, es decir, acciones que *mitiguen los efectos causados por el evento inicial* y de esta forma tratar de evitar, en todo momento, la consecuencia de un accidente grave. Además cuentan con un sistema de análisis de fallas mediante lógica binomial como se muestra en la Figura 1.4.

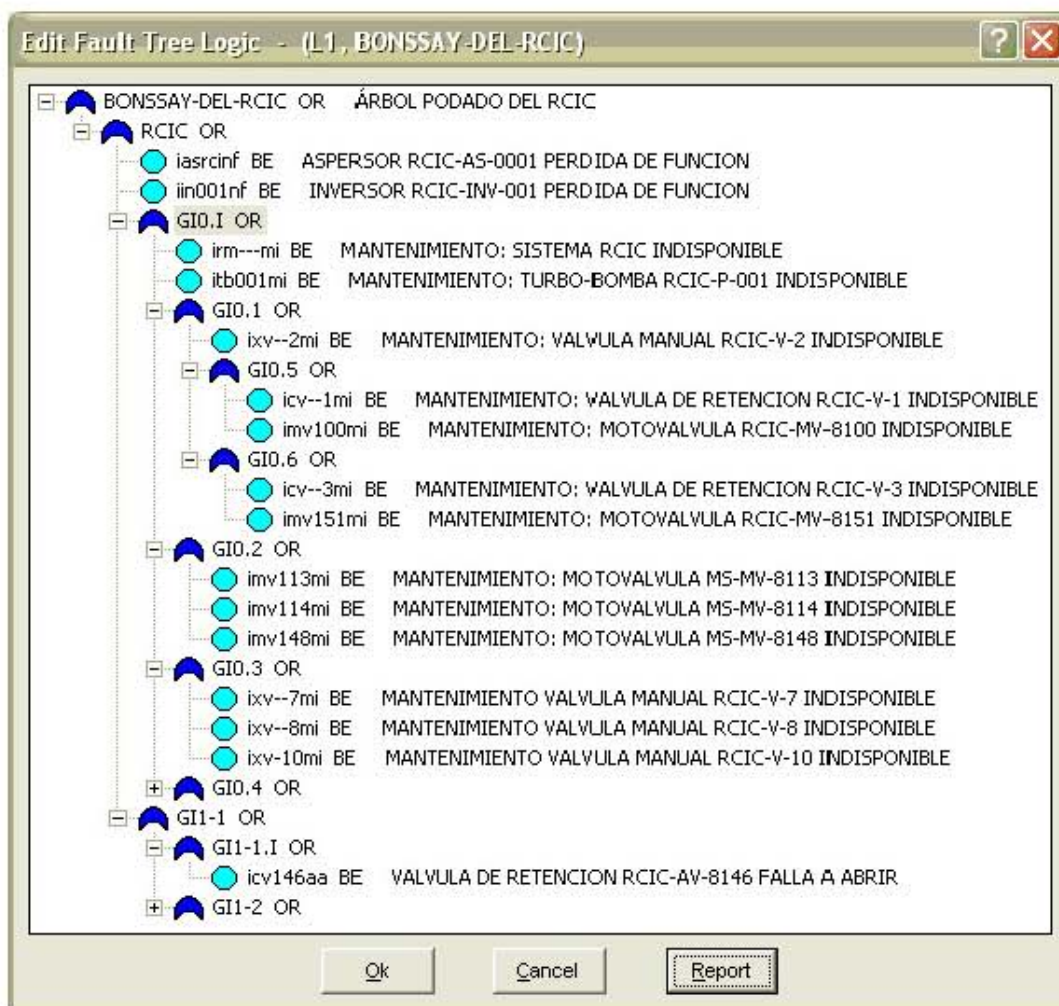


Fig. 1.4. Árbol de fallas del sistema RCIC por sus siglas en inglés *Reactor Core Isolation Cooling System*

El apoyo que estos sistemas pueden proporcionar al supervisor, se ve reducido debido a que en un estado de emergencia, la respuesta que se demanda *es rápida y eficiente*.

1.6 TRABAJOS RELACIONADOS

Uno de los puntos centrales en el comportamiento de un experto es la toma de decisiones. Los trabajos relacionados van en este sentido donde el dominio de aplicación varía. En el caso de estudio es un sistema predictivo que muestra el estado final a partir de varios estados en curso, sean estos *imaginarios o reales*. Una vez encontrado el estado final se pueden hacer inferencias que sugieran varias acciones al experto humano. A continuación se describen algunos de estos trabajos.

El trabajo sobre el control anticipado propone el uso de un sistema multiagente en el control general de la planta, organizando para ello el control en dos capas, una enfocada a los problemas que emergen debido al uso y fatiga de la planta; y otra, enfocada a eventos básicos de diseño no anticipado. De manera que cada subsistema de control y monitorización se convierte en un agente, es decir, que encapsula un comportamiento capaz de distribuir información crítica a cualquier agente que la necesite para ejecutar sus tareas prescritas. Esto es lo que los autores denominan trabajo proactivo [29].

Por lo que respecta al modelado de sistemas de control inteligente, Stylios y Groupos proponen el modelado del comportamiento y operación de sistemas complejos mediante

los MDC, particularmente en el modelado de un supervisor de un sistema de control jerárquico [40].

En el trabajo de Laureano-Cruces et al.[22], se propone un sistema multiagente donde se desarrolla un diseño reactivo para el proceso de toma de decisiones a través del uso de: un modelo cognoscitivo, conjuntos difusos y agentes reactivos [18]. Es un intento por estimar las temperaturas existentes (estáticas de formación), a partir de temperaturas registradas. Se diseñó un comportamiento adaptable tomando en cuenta la experiencia del humano en la toma de decisiones para un método de convergencia. El dominio se encuentra ubicado en la perforación de pozos geotérmicos y se utiliza un simulador de dicha acción. El experto humano es representado por un agente y el simulador que representa el entorno, sobre el que va a actuar el agente.

Por su parte, Peláez y Bowles exploran la aplicación de los MCDs en el análisis de efectos de fallas, evaluando sistemas complejos para determinar los efectos de las fallas de componentes en la operación del sistema. Proporcionan además una estrategia para predecir efectos de fallas en un sistema complejo [32, 33].

En el caso del trabajo desarrollado por Méndez-Gurrola [29] se utilizan los MCDs para predecir los efectos de supernova partiendo de escenarios probables en donde la presencia de ciertos elementos es indispensable en la formación de supernovas, proporciona todo un caleidoscopio de escenarios posibles para el experto humano. Los principales retos mencionados en este trabajo son por una parte la adecuada adquisición del conocimiento, debido a que la Astrofísica es un campo interesante pero estricto en el manejo de conceptos, y por otra parte es encontrar el adecuado diseño de la representación del conocimiento y el diseño del razonamiento a través de esta representación para obtener un correcto sistema de predicción.

Khan, Chong y Quaddus presentan en su trabajo la evolución de los MCDs en una relativamente nueva herramienta en el análisis de toma de decisiones [13].

En el trabajo desarrollado por Laureano-Cruces et al. [23-25]. Se utilizan los MCDs con el fin de *decidir* las mejores tácticas didácticas de un sistema experto aplicado a la educación, cuyo dominio es la didáctica general aplicada a un proceso de enseñanza-aprendizaje. Este dominio consta de dos tipos de estrategias las cognitivas referentes al dominio específico y las afectivas referentes a los incentivos y contextualizaciones por parte del experto en enseñanza. En este caso, dado un estado en curso del estudiante, *sea este favorable o no*, el proceso de inferencia nos da como resultado la combinación de acciones necesarias con el fin de lograr el aprendizaje.

Estos trabajos abordan aspectos de la operación automatizada de los sistemas, haciendo un acercamiento desde dos perspectivas distintas en la toma de decisiones; 1) mediante agentes reactivos; y 2) MCDs. Hay que hacer hincapié que para lograr el modelado del comportamiento de decisiones, ambos métodos necesitan de un análisis y diseño del comportamiento del proceso/conducta a representar, en el caso de estudio se utilizó el análisis cognoscitivo basado en el comportamiento del experto humano [21]. Sin embargo, existen otras técnicas, para mayor profundización consultar [40]. En nuestra propuesta, se realiza primero el análisis de efectos de parámetros de una planta para obtener una predicción sobre el estado futuro de los mismos [32, 33], determinando con ello la posibilidad de una emergencia. Posteriormente se lleva a cabo la automatización de la tarea realizada por el supervisor (experto humano), es decir, la toma de decisiones frente a eventos de riesgo de posibles accidentes graves. Para lograrlo se utilizó como herramienta de diseño el análisis cognoscitivo de tareas [21] (para obtener la conducta cognoscitiva del experto) que se aborda en el *capítulo 5*.

1.7 SISTEMA PROPUESTO

Dentro de la operación de una planta nuclear, existen diversos escenarios de falla originados por determinados eventos iniciales, el escenario que elegimos es el denominado LOCA pequeño por sus siglas en inglés *Loss Of Coolant Accident*, por ser uno de los escenarios más representativos de accidentes en una planta nuclear. El escenario LOCA pequeño es originado por el evento inicial de una fuga pequeña de refrigerante [12].

Actualmente, los análisis de fallas se llevan a cabo mediante metodologías como las mostradas por las Figuras 1.2, 1.3 y 1.4.

Nuestra propuesta consiste en un sistema predictivo auxiliar en la toma de decisiones en procesos complejos bajo circunstancias de riesgo dentro de una planta nuclear. Este sistema implica entender primero la conducta del experto, de manera que se puedan identificar los elementos que toma en cuenta para tomar una decisión específica. Entender, además, las relaciones de causalidad que guardan entre sí los elementos involucrados. Esto nos permite realizar un modelo sobre el comportamiento del experto en la toma de decisiones frente a una situación de riesgo causada por un escenario de falla específico.

Es necesario aclarar, que la decisión que toma el experto es con el fin de *mitigar los efectos que una falla puede producir, incluyendo la normalización de parámetros esenciales en la operación de una planta*, como presión, temperatura, nivel de agua; y evitar así, un accidente grave como resultado final del estado de emergencia producida por uno o más parámetros fuera del rango normal de operación [10]. Por ello se realiza, además del análisis de la conducta del experto, un análisis de los efectos que estos parámetros pueden producir si se encuentran fuera del rango normal de operación. Con este análisis de efectos realizado, aplicando como técnica de representación del conocimiento experto los MCDs [32, 33], se obtiene el estado futuro de dichos parámetros. Sobre este estado futuro, el supervisor es capaz de tomar una decisión anticipada para normalizar la operación de la planta, de manera que logre salir del estado de emergencia producida por los parámetros fuera del rango de operación normal, mitigando además, los efectos que en tales condiciones se puedan producir.

Las estrategias de mitigación y normalización que el supervisor puede establecer sobre la predicción de los parámetros de operación, se encuentran descritas en la guía de procedimientos en emergencia de la planta, elaborada de acuerdo a los códigos de seguridad que rigen a una planta nuclear [10]. La estrategia elegida por el supervisor dependerá de la disponibilidad de los sistemas de mitigación con que cuenta la planta nuclear, como por ejemplo, el sistema de enfriamiento a alta presión denominado HPCS por sus siglas en inglés *High Pressure Core Spray* utilizado para el enfriamiento del núcleo a alta presión [12]. Mediante un análisis de efectos de fallas aplicando MCDs [32, 33] se obtiene la disponibilidad de uno de los principales sistemas de mitigación como lo es el sistema HPCS. Dicho análisis determina el efecto de la falla de uno o más elementos que conforman el sistema mitigante, indicando como resultado si el sistema funciona, es decir, si se encuentra disponible para ser utilizado.

El análisis cognoscitivo de la conducta del experto, por su parte, comprende la decisión que puede tomar, al elegir una determinada combinación de sistemas de mitigación disponibles. Este análisis realizado mediante el uso de los MCDs, proporciona como resultado, el estado futuro de la planta nuclear. Lo anterior constituye la evaluación de la decisión tomada de manera anticipada como respuesta de mitigación a los efectos que puede producir un escenario de falla o una situación de emergencia debido a un cambio en los parámetros esenciales de operación de una planta nuclear.

Cabe mencionar que el modelo final en cada uno de los análisis que se llevaron a cabo (análisis de efectos de parámetros en emergencias, análisis de fallas en sistemas mitigantes, análisis de decisiones en el uso de sistemas mitigantes disponibles dentro del escenario LOCA pequeño) es una evolución a través de varios modelos. Dicha evolución

permitió, entre otras cosas tener la certeza de que los elementos del modelo final son los necesarios para modelar la conducta del experto, pero sobre todo, significan los ajustes a las relaciones de causalidad establecidas entre los diferentes elementos y el número de elementos. *Además de que los resultados obtenidos fueron avalados en todo momento por el experto.*

Capítulo 2

LA REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO, EL RAZONAMIENTO Y LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

La representación del conocimiento y el razonamiento forman parte fundamental del diseño del sistema experto. En el caso de estudio el mundo real, está representado por los distintos eventos que se pueden manifestar en la operación de la planta nuclear. Dichos eventos se caracterizan por un conjunto de elementos interrelacionados a través del razonamiento experto. En este capítulo, por tanto, se describirán los diversos tipos de representación del conocimiento y razonamiento. Los mapas cognoscitivos difusos (MCDs), en particular, se abordarán en el *capítulo 3*. Los MCDs por sus características con respecto al manejo de la incertidumbre y a su capacidad para el procesamiento paralelo distribuido es el que hemos elegido para la representación de la conducta del experto frente a un evento de falla determinado o, en su caso, frente al efecto de parámetros esenciales como la temperatura, presión, nivel de agua, etc., durante un estado de emergencia.

INTRODUCCIÓN

La palabra cognición se refiere actividades mentales que: 1) lidian con información abstracta que provienen del mundo real, 2) su representación, y 3) la forma es en que se accede a esta información desde la memoria. Lo anterior incluye construcción en el más alto nivel de percepción a partir de los niveles de percepción más bajos.

Cómo se lleva a cabo el proceso de cognición ha sido tema de estudio científico tanto de la neurología como de la psicología. De uno y otro enfoque ha nacido la neuropsicología, misma que ha desarrollado experimentos para estudiar el proceso de la cognición de principio a fin, es decir, desde la sensación (información sensorial), hasta llegar a la acción, pasando por la percepción del mundo real, el razonamiento y la representación del conocimiento. Existen muchos tipos de modelos que hacen referencia a la forma de representación de los humanos. Memorias de largo alcance (MLA), de corto alcance (MCA), memoria ecoica, semántica y procedural. Konar [14] propone un modelo del proceso de cognición como un ciclo conformado por los siguientes estados mentales:

- *Sensación*, que dentro de la ciencia cognoscitiva, se refiere al filtrado y extracción de características de la información recibida a través de los sentidos (por ejemplo, sonido, forma, tamaño, color, olor, etc.) para ser almacenadas por corto tiempo en la MCA.
- *Adquisición*, en la cual, se compara la reacción de la MCA con la información ya adquirida y almacenada permanentemente en la MLA.
- *Percepción*, que se refiere a la actividad mental que construye el conocimiento a partir de datos sensoriales para después usarlo en el razonamiento.
- *Planificación*, que determina los pasos necesarios que involucran la acción para alcanzar el objetivo, es decir, resolver el problema.
- *Acción*, que determina los comandos de control para ejecutar el plan para un problema dado.

En la Figura 2.1 se muestra el modelo conceptual correspondiente al proceso de cognición descrito como un ciclo de estados mentales:

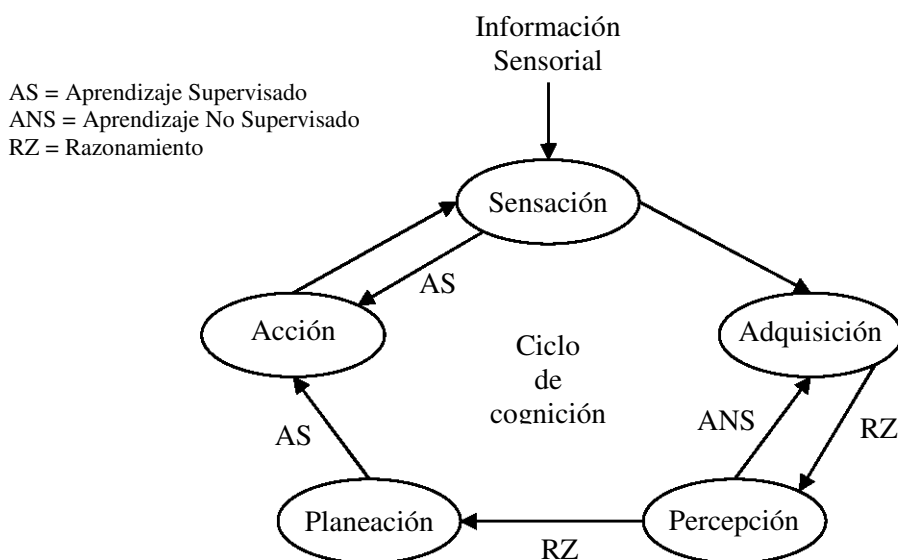


Fig. 2.1. Los estados mentales de la cognición y sus relaciones.

En esta representación se potencia el hecho de que la planificación más sencilla en un ser humano abarca los cinco estados de cognición. A continuación se muestra un ejemplo de Konar [14].

Ejemplo del ciclo de cognición (pasa por todos los estados)

En este caso se tiene como escena de entrada un gato dormido en el pasillo y un paquete de leche que ha dejado el lechero, y a las redes semánticas como herramienta para la representación del conocimiento.

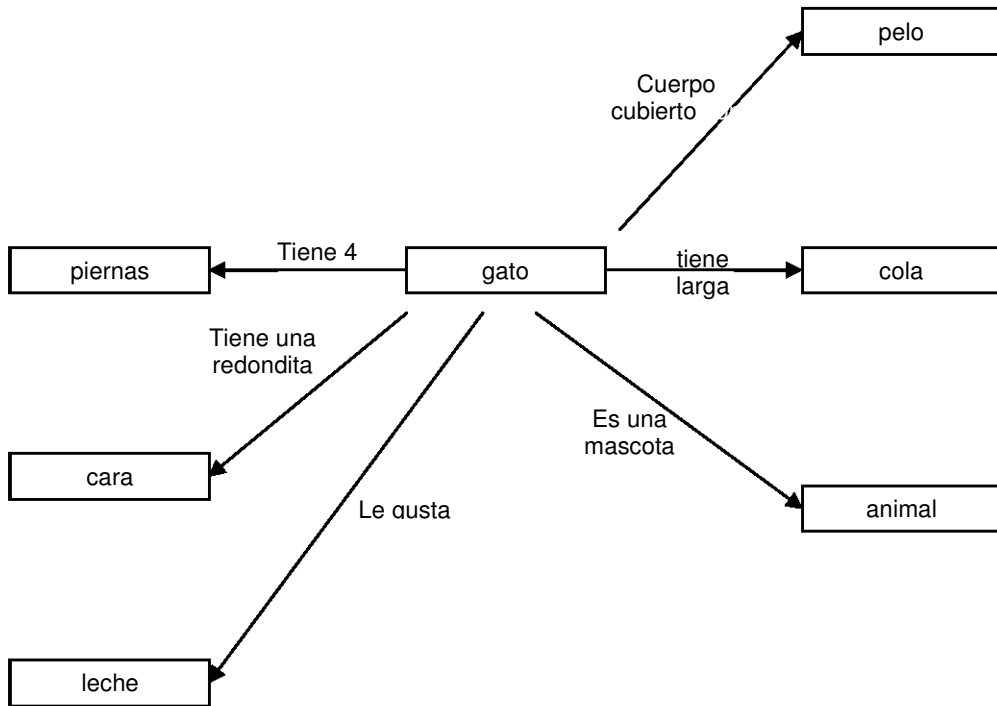
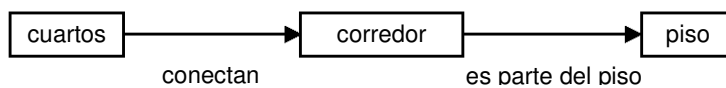
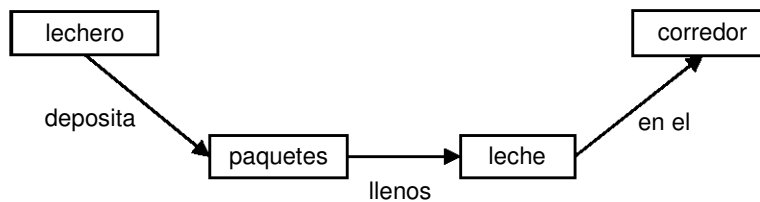


Fig. 2.2. Estado de percepción con respecto a un gato en una memoria semántica



a) El estado de la percepción del corredor en la memoria semántica



b) Típica red semántica de un hecho en estado de percepción

Fig. 2.3. Estado de percepción

La unidad para el proceso de sensar es una video-cámara, que recibe la imagen digital del gato en el corredor. La imagen se preprocesa en un mapa de bits y se almacena en un medio magnético ≈ unidad que adquiere.

En el caso de los humanos, ellos extraen algunos aspectos importantes del entorno:

- El perfil
- La cara
- La longitud de la cola
- Las orejas
- Textura
- Postura

Estos aspectos dependen de la experiencia y la edad de la persona (ejemplo: distintos contextos de juegos). En el caso de un niño de 10 meses; solo se extraen los bordes de la cara, mientras que en un niño de 3 años se extrae la cara y su cola. Un adulto da prioridad a la postura, almacena ésta en la MCA y la utiliza como llave, para subsecuentes búsquedas en la MLA.

La MLA, en el presente contexto es una red semántica, que almacena la información sobre diferentes criaturas y sus atributos.

Cómo funcionan los estados de percepción, planificación y acción

Tomando como proceso cognoscitivo la siguiente frase:

- el lechero deposita los paquetes llenos de leche en el corredor.

Y ahora combinando todas las redes semánticas formamos un modelo entero de la escena, que junto con las piezas adicionales de conocimiento como:

- Si una criatura viva le encanta algo, y se mantiene alejada de ese algo, entonces no lo puede acceder

El plan

Las redes y el conocimiento anterior ayuda a desarrollar el siguiente plan de acciones, a través de un razonamiento hacia atrás:

- Muévete a través del corredor
- Recoge los paquetes de leche
- Ponlos en un lugar seguro, lejos del alcance del gato
- Para un ser humano desarrollar este plan casi no conlleva tiempo

Tal vez se deba a un esquema de aprendizaje supervisado, que ayuda a generar tal planificación.

La red semántica

En el caso de la representación del conocimiento, ésta necesita varias extensiones para manejar varios estados de cognición y ser útil como herramienta de representación del conocimiento y razonamiento. Este ejemplo nos muestra como una acción aparentemente sencilla para un ser humano, es difícil de lograr para un sistema inteligente de aquí el hecho fundamental de: elegir la mejor representación del conocimiento y la bondad del nuevo paradigma que implica procesamiento distribuido y paralelo.

En las siguientes secciones mencionamos aspectos que de forma independiente conforman el todo de una elección para la representación y razonamiento del conocimiento en un sistema inteligente como son: 1) los distintos tipos de búsqueda, 2) las características importantes que se tienen que considerar para la comprensión de un problema, y 3) los distintos tipos de representación del conocimiento. En el caso de estudio lo anterior se traduce en que el ingeniero de conocimiento tiene que poder comprender el problema que resuelve el experto humano y en cómo encontrar los elementos indispensables utilizados por éste. Lo anterior con

el fin de resolver un problema. Finalmente esta reflexión nos ayuda a una buena elección del tipo de representación y tipo de razonamiento para el sistema inteligente.

2.1 REPRESENTACIÓN Y RAZONAMIENTO

Dentro de la inteligencia artificial (IA) uno de los temas de estudio es la representación del conocimiento y el razonamiento, por ello se trata de realizar el comportamiento descrito en los modelos conceptuales sobre la cognición a través de herramientas y técnicas inteligentes.

De acuerdo a Greeno [14] entender un problema involucra construir una representación interna del problema planteado, donde es indispensable la existencia de un objetivo bien definido. Lo anterior queda representado: por lo que se busca y el camino óptimo generado para lograrlo. Los caminos o el camino hacia la resolución de un problema, dentro de IA, es conocido como el espacio de búsqueda y se considera que está constituido por una serie de estados, donde el estado final es el objetivo predefinido.

En un problema de razonamiento, se tiene que alcanzar el estado-objetivo predefinido a partir de uno o más estados iniciales dados, de manera que entre menor número de transiciones se den para alcanzar ese estado-objetivo, mayor eficiencia tendrá el sistema de razonamiento. Incrementar la eficiencia de un sistema de razonamiento, por tanto, requiere de minimizar el número de estados intermedios. Para ello, se necesita indirectamente, de una base de conocimientos completa y organizada. Esta base de conocimientos necesita una mínima búsqueda para identificar el conocimiento apropiado requerido en cada etapa del proceso de resolución del problema.

2.1.1 TIPOS DE BÚSQUEDAS

Existen distintas formas de búsqueda: las deterministas y las no deterministas (heurísticas). En las deterministas el orden en que se recorre el espacio de búsqueda es conocido, entre ellas podemos mencionar los recorridos: a lo ancho y en profundidad. Representando el espacio de búsqueda como un árbol cuyos nodos constituyen cada uno de los estados, la búsqueda a lo ancho significa recorrer los estados en el orden mostrado en la Figura 2.4.

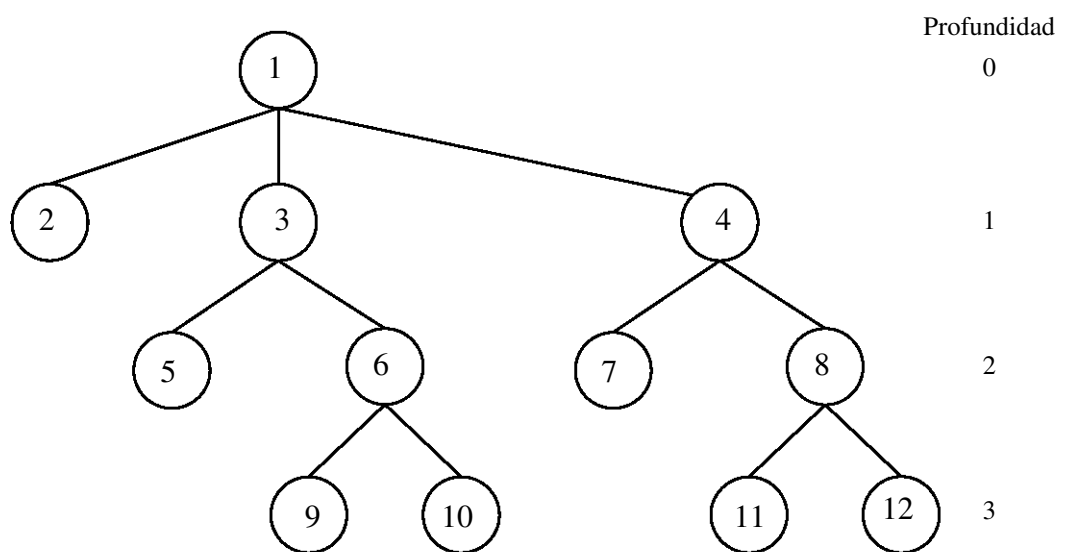


Fig. 2.4. Árbol de búsqueda a lo ancho

En cuanto a la búsqueda en profundidad, el recorrido se realiza en el orden como se muestra en la Figura 2.5.

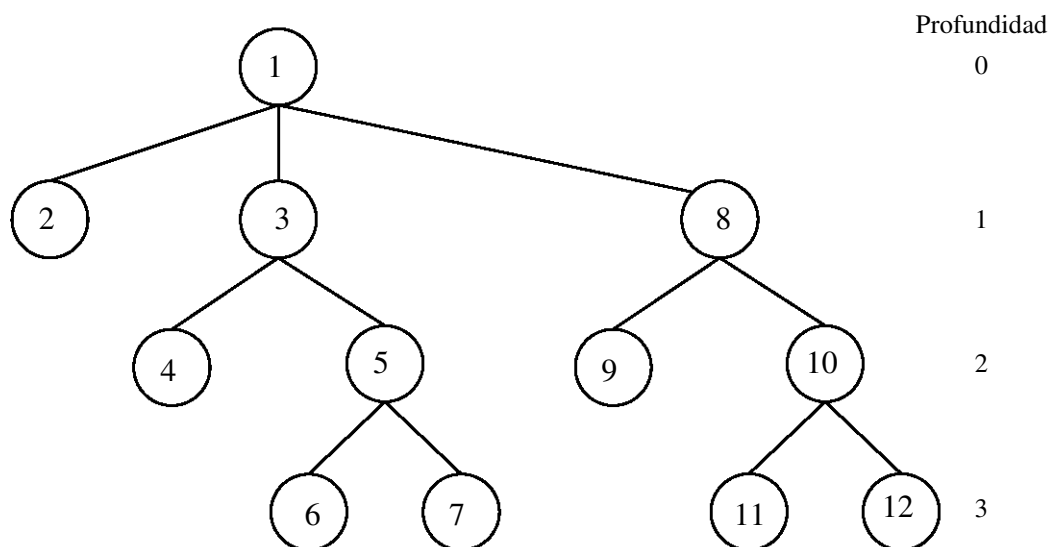


Fig. 2.5. Árbol de búsqueda en profundidad

En ambos recorridos, el orden está establecido, es decir, determinado; de ahí el nombre de búsquedas deterministas.

Hay que aclarar que la complejidad de búsqueda de la búsqueda en profundidad es lineal mientras que el de la búsqueda a lo ancho es exponencial, por esta razón se elige la búsqueda en profundidad como parte básica de los algoritmos de búsquedas heurísticas considerando a los árboles como representación del espacio de búsquedas [14].

En el caso de las no deterministas, el orden en que se recorren los estados en el espacio de búsqueda depende totalmente de los datos. Dentro de las no deterministas, se encuentran las denominadas búsquedas heurísticas, en las que el orden a seguir depende de la selección de aquellos nodos más prometedores, midiendo para ello su validez comparada con la de sus contrapartes, mediante las funciones heurísticas. Estas funciones son funciones especializadas e intuitivas. Por lo anterior, las búsquedas heurísticas trabajan exitosamente en muchos casos pero este éxito no está garantizado.

Dentro de las búsquedas heurísticas contamos, entre otras, con los algoritmos de: *hill Climbing* y *best first*.

Un aspecto alternativo para resolver el problema de buscar en un espacio dado es hacer una búsqueda dirigida empleando una función que evalúe el desempeño $f(x)$. Dicha función nos da una medida estimada de la distancia a la que se encuentra el nodo objetivo dado un nodo. Después de que $f(x)$ es evaluada:

- Los nodos son ordenados en forma ascendente, y colocados dentro de la PILA, de esta forma el elemento en el tope de la PILA, se encuentra el valor menor de $f(x)$.
- Se saca el valor de la PILA y se compara con el nodo objetivo, si no es el objetivo entonces se expanden sus hijos, se estima su función $f(x)$ y de acuerdo a este valor se colocan en la PILA de forma ascendente.
- Si el valor que se saca de la PILA es el objetivo, se para y si no, continúa hasta que la PILA está vacía.

En *best first*, se comienza con un estado prometedor a partir del cual se generan todos

los nuevos estados posibles. Una vez desarrollado el paso anterior se evalúan todas las funciones $f(x)$ de estos estados posibles, se colocan en la LISTA y se elige la mejor para su expansión. Se vuelven a calcular los $f(x)$ de los hijos y se colocan en la Lista, se elige el mejor de todos los nodos hijos y los anteriores. Este proceso tiene el fin de considerar todos los nodos y en caso de haber cometido un error quede éste rectificado.

Hemos recordado varios tipos de búsqueda, mismos que pueden ser utilizados para identificar un pedazo de conocimiento dentro de un espacio de búsqueda constituido por una base de conocimientos. Para realizar estas búsquedas es necesario que la base de datos se encuentre organizada. La organización del conocimiento es de principal importancia en el proceso general de construcción de una base de conocimiento. Dicho proceso es lo que se conoce como ingeniería del conocimiento [38].

Desde la antigüedad hasta Hegel, y aún después, los teóricos del conocimiento abrazaron el ideal de que nuestro conocimiento tuviera un desarrollo arquitectónico y se organizara dentro de una estructura articulada, que exhibiese los ligamentos que unen sus componentes en un todo integrado, sin dejar nada totalmente aislado o desconectado.

Así como el orden de las cosas puede ser caracterizado como simple o complejo, también puede ser caracterizado como sistemático o no sistemático. De acuerdo con esto, la sistematicidad se relaciona en primera instancia no con *aquellos* que conocemos *los hechos en cuestión en los tópicos de información de que disponemos* sino más bien con *cómo procedemos a organizar nuestro conocimiento de esos hechos*. Un sistema de conocimiento no es precisamente una colección de tesis aceptadas, sino que también incluye la *racionalidad* que avala esa aceptación. La caracterización de una tesis incluida en un sistema en términos como *verdadero, garantizadamente afirmable*, u otros similares es el producto de operaciones de principios fundadores de racionalidad, que no son menos clave para el sistema que las tesis mismas que él alberga. [36]

En IA, organizar, o mejor dicho, sistematizar este conocimiento implica contar con una representación del mismo lo más aproximado al mundo real al que pertenecen dichos conocimientos. Dependiendo de esta representación y su aproximación con el mundo real, la resolución de un problema dado dentro de ese mundo real, será más o menos complejo.

La diversidad en los problemas del mundo real que se plantean hace prácticamente imposible el uso de una técnica única para su representación de ahí que se cuente con diversas técnicas de representación del conocimiento que se aplican de acuerdo a las características del mismo.

2.2 TÉCNICAS DE REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

En IA existe una variedad de técnicas que se utilizan para la representación del conocimiento: reglas de producción, redes semánticas, marcos, guiones, lógica de predicados y mapas cognoscitivos difusos, entre otras. Utilizar una u otra dependerá del problema a resolver [14] y de la capacidad de entender un problema.

Entendiendo un problema

De acuerdo a Greeno, comprender un problema involucra la representación interna del estado del problema. Por ejemplo para comprender una oración, se necesita una representación de: palabras, frases, alguna semántica entre las palabras. Lo anterior con el fin de encontrar un significado en la oración.

Elementos que se necesitan para comprender un problema:

Coherencia: es un patrón de representación de tal forma que sus componentes (fragmentos) tengan sentido. Es dar el mismo énfasis a cada componente del patrón (como es el caso de los MCDs). Por ejemplo, en el caso del sistema refrigerante, *cuando existe una falla en una válvula del sistema es posible que el sistema HPCS falle.*

Correspondencia: se refiere a un mapeo uno a uno desde el problema a la representación mental. Si este mapeo es incompleto o incorrecto no será factible una comprensión. La correspondencia en la mayoría de los casos esta determinada por el siguiente componente.

Relación con el conocimiento básico: el conocimiento básico es esencial para hacer el mapeo de los componentes del problema a la representación mental. Sin ella las personas fallan en la comprensión de las palabras en una oración, perdiendo de esta forma la interconexión de unas con otras palabras dentro de la oración. Los estudiantes pueden sentir el significado de éste efecto cuando van a una clase sin haber entendido los aspectos importantes de la anterior.

Pasos para comprender un problema

Entender un problema consiste de dos pasos básicos:

1. Identificar la información pertinente a partir de la descripción de un problema, eliminar la información innecesaria.
2. Organizar un esquema de forma correcta.

Estos pasos están relacionados con el análisis y diseño del comportamiento del sistema. Las técnicas de análisis y diseño que dan como resultado un modelo cognoscitivo, en el caso concreto de estudio se utilizaron: análisis cognoscitivo de tareas, modelos mentales, grafos conceptuales y mapas cognoscitivos.

El primer paso está relacionado con la reducción de la generalidad, resaltando los puntos importantes de éste. Una vez pasado este punto, el siguiente paso consiste en representar los aspectos del problema en una representación interna que describa a éste fielmente. Este paso se comienza a desarrollar en la *sección 5.3.1.*

El significado del último paso radica en una codificación exacta de los aspectos importantes en una representación mental. De aquí que entre la representación y la semántica no exista diferencia aparente (como analogía el análisis y diseño de un problema y su código).

La elección de una estructura y la organización de los datos/información por esa estructura, debe estar dada por la prioridad de comprensión del problema. Debe hacerse notar que la eficiencia entre el tiempo/comprensión del problema se debe en gran parte a la representación y en consecuencia a una buena elección del tipo de estructura.

Existen otros problemas que pueden ser modelados con códigos de forma proposicional u otras técnicas de representación del conocimiento.

Identificar la mejor representación de un problema es un arte y solo se puede aprender de forma intuitiva. No existen reglas rígidas y rápidas que puedan enmarcar de forma rápida y sencilla la identificación de la representación del espacio del problema.

A continuación se describen brevemente algunas de ellas, mismas que pueden consultarse más ampliamente en [14].

2.2.1 REGLAS DE PRODUCCIÓN

Las reglas de producción constituyen una de las técnicas de representación del conocimiento más antiguas. La estructura de una regla de producción puede ser establecida de la siguiente manera:

$$RP1: P1(x) \wedge P2(y) \wedge \dots \wedge Pn(x,z) \rightarrow Q1(y) \vee Q2(z) \vee \dots \vee Qm(y,x)$$

donde P_i y Q_j son predicados; x, y, z son variables; “ \wedge ”, “ \vee ” y “ \rightarrow ” denotan los operadores lógicos Y, O y SI_ENTONCES respectivamente. El lado izquierdo de una regla de producción se denomina antecedente/condicional y el lado derecho consecuencia/conclusión. De la misma manera, P se denomina predicado antecedente, mientras que Q se denomina predicado consecuencia.

El antecedente y la consecuencia, no necesariamente son siempre predicados, pueden ser representados por tripletas objeto-atributo-valor, por ejemplo:

$$RP2: SI (edad\ cerca\ de\ 21) \ \& \ (cero\ esposa) \ \& \ (hombre) \ ENTONCES (elegible\ para\ casarse)$$

2.2.2 REDES SEMÁNTICAS

Las redes semánticas fueron usadas principalmente para entender el lenguaje natural. La semántica (significado) de las palabras asociadas en una sentencia es extraída en forma de red.

Las redes semánticas constan de dos tupletas elementales: eventos representados por nodos y relaciones entre los eventos, representados por ligas/arcos como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.6.

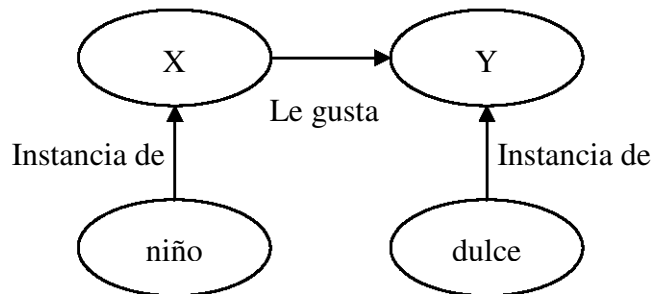


Fig. 2.6. Red Semántica

2.2.3 MARCOS

Un marco está definido como una estructura que contiene un número de recuadros, donde los atributos de un marco se encuentran clasificados por su tipo. En general los recuadros en un marco son llenados con valores, aunque también puede contener otro marco. Lo más importante a considerar en un marco son la contención y la especialización.

La contención significa que un recuadro en el marco contiene a otro marco y esto está denotado por la flecha. En la Fig. 2.7 se observa un ejemplo de este tipo de representación.

La especialización significa que un marco contiene propiedades especializadas y forma parte de un marco genérico.

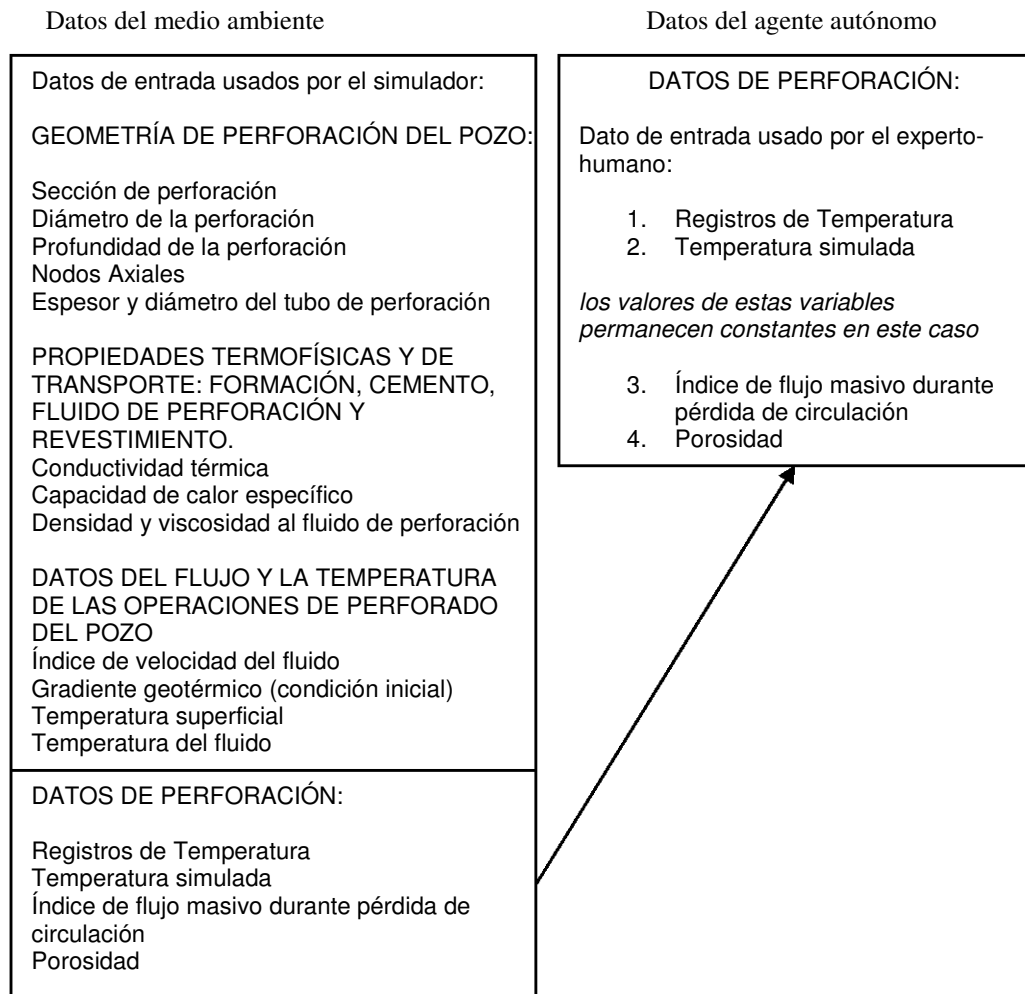


Fig. 2.7. Sistemas dinámicos que constituyen el medio ambiente y el agente autónomo

2.2.4 GUIONES

Los guiones representan secuencias de eventos en un contexto particular. Puede representar, por ejemplo, escenas en un restaurante, mercado o salón de clases. En cada escena existe una secuencia de operaciones. Un guión consta de los siguientes componentes:

- 1) Condiciones de entrada: Condiciones que deber ser satisfechas antes de que los eventos descritos en el guión ocurran.
- 2) Escenas: Las secuencias de eventos que ocurren. Los eventos se describen siguiendo los formalismos de la dependencia conceptual.
- 3) Papeles: Estos son recuadros que representan personas/actores involucrados en los eventos.
- 4) Accesorios: Recuadros usados para los objetos involucrados en los eventos de un guión.
- 5) Pista: Representa variaciones específicas de un patrón más general que está representado por un guión particular.
- 6) Resultados: Las consecuencias después de ocurridos los eventos en el guión.

Ejemplo:

<p>Guión Pista: Salón 1 Accesorios: Asientos (A) Preguntas (P) Hoja de Respuestas (HR) Escritorio (E) Engrapador (Eg)</p> <p>Papeles: C = Candidatos Ay = Ayudantes S = Supervisor</p>	<p>Escena 1: Candidatos entran al salón</p> <p>C TRANS C dentro del salón C VISUALIZA su asiento C TRANS C hacia su asiento C MUEVE su cuerpo hasta sentarse</p>
<p>Condiciones de Entrada: C tiene un número de asiento en el salón 1 S le corresponde supervisar el salón 1</p> <p>Resultados: HR llenadas y recogidas P exhaustivas</p>	<p>Escena 2: Supervisor entra al salón</p> <p>S TRANS S dentro del salón S VISUALIZA su asiento S TRANS S hacia su asiento S MUEVE su cuerpo hasta sentarse</p>
	<p>Escena 3: Hojas de respuestas distribuidas</p> <p>S TOMA HR S TRANS hacia cada uno de los asientos S MUEVE la mano para dejar el HR en el asiento</p>
	<p>Escena 4: Hojas de preguntas distribuidas</p> <p>S TOMA P S TRANS S a cada uno de los asientos S MUEVE la mano para dejar las P en el asiento</p>
	<p>Escena 5: Supervisor vigila a los candidatos</p> <p>S TRANS a cada uno de los asientos S VISUALIZA HR</p>
	<p>Escena 6: Candidatos escriben y firman sus hojas después de escribir</p> <p>C ATRANS HR C TOMA HR C TRANS HR al S</p>
	<p>Escena 7: Candidatos salen del salón</p> <p>C TRANS C fuera del salón</p>
	<p>Escena 8: Supervisor sale del salón</p> <p>S TRANS S fuera del salón</p>

Fig. 2.8. Guión de una sala de examinación escolar

2.2.5 LÓGICA DE PREDICADOS

Las reglas de producción han sido usadas en muchos sistemas inteligentes por su simplicidad pero la complejidad de los problemas del mundo real causa que la eficiencia de esta técnica decaiga. En tales casos, la lógica de predicados constituye una alternativa debido a que proporciona, además de los operadores lógicos Y, O, otros elementos como los llamados cuantificadores. Dichos elementos facilitan la representación de conocimiento más complejo.

La lógica de predicados, también llamada lógica de predicados de primer orden o lógica de primer orden, o cálculo de predicados; tiene los siguientes cuantificadores, el cuantificador esencial (\forall) y el cuantificador existencial (\exists). Además cuentan con dos propiedades fundamentales, el algoritmo de unificación y el principio de resolución.

También constan de una serie de conectivos, los cuales son operadores lógicos que conectan sentencias simples para construir otras más complejas y son los siguientes: Y (\wedge), O (\vee), Negación (\neg , \sim), Si p entonces q ($p \rightarrow q$), Si p entonces q y si q entonces p ($p \leftrightarrow q$), Implicación (\Rightarrow), Implicación bidireccional (\Leftrightarrow), Identidad (\equiv), Implicación lógica (\vdash), Derivación (\vdash).

2.3 CONCLUSIONES

Como hemos visto, existe una amplia variedad de pasos para el desarrollo de los proyectos de *ingeniería del conocimiento*, sin embargo, podemos resumirlos de acuerdo a Russell y Norvig [38] quienes identifican los siguientes:

- 1) Identificar la tarea; 2) Recopilar el conocimiento relevante; 3) Traducir los conceptos importantes del nivel de dominio a nombres del nivel lógico, cuyo resultado es la ontología del dominio (ontología significa entender la naturaleza del ser o de la existencia de algo, estableciendo el tipo de cosas que existen pero sin determinar sus propiedades e interrelaciones específicas); 4) Codificar el conocimiento general acerca del dominio (la codificación tiene que ver con la representación del conocimiento y el paso 3); 5) Codificar una descripción de la instancia de un problema específico (es el equivalente a los datos de entrada de un sistema); 6) Plantear peticiones al procedimiento de inferencia (razonamiento) y obtener respuestas y 7) Depurar la base de conocimientos, esto se debe a que rara vez, las respuestas a las peticiones son correctas en un primer intento, por ello es necesario hacer ajustes en los conceptos y relaciones donde la cadena de razonamiento se detiene inesperadamente.

Los primeros cuatro pasos son los determinantes para obtener resultados aceptables en cada proyecto. Estos pasos son los que nos llevan al problema de la representación y que una vez resuelto permitirá que el proceso de inferencia (razonamiento) sea más aproximado al mundo real y con ello la obtención de resultados más confiables. En dominios simples, el problema de la representación es fácil y por ello no significa realmente un problema, en cambio, en los dominios complejos como el control de un robot o el control en una planta nuclear en un entorno físico cambiante, requieren representaciones más generales y flexibles. Estas representaciones se centran en conceptos generales del dominio como las acciones, el tiempo, los objetos físicos, las creencias. De acuerdo a Russell y Norvig, la representación de estos conceptos abstractos se suele denominar como ingeniería ontológica y está relacionada con la ingeniería del conocimiento.

Una ontología ya sea general o de propósito específico que se adapte mejor al mundo real debe permitir cambios simultáneos que se extiendan en el tiempo, es decir, que dicha representación pueda corresponder a los cambios que se puedan presentar en el mundo real a través del tiempo.

La ontología de propósito general debe poder aplicarse en mayor o menor medida a cualquier dominio de propósito específico con sólo incluir los axiomas específicos del dominio. Por ello es importante no refinar a tal grado los aspectos a representar porque se corre el riesgo de que pudieran llegar a ser ignorados.

La organización de objetos en categorías es primordial para la representación del conocimiento, porque aún cuando en el mundo real la interacción entre objetos se da a nivel individual, la mayoría del proceso de razonamiento se hace a nivel de categorías. Esto permite que aún sin conocer todos los objetos individualmente, se reconoce un nuevo objeto porque se le considera parte de una categoría ya conocida. Lo anterior sirve para hacer predicciones porque se puede inferir la categoría a partir de las propiedades percibidas del objeto y usar entonces la información que se tenga de dicha categoría para realizar predicciones acerca de los objetos. Las categorías permiten organizar y simplificar el conocimiento base a través de lo que se denomina como herencia. La herencia significa que los objetos que pertenecen a una misma categoría comparten las propiedades de dicha categoría, por esto se dice que una categoría hereda sus propiedades a los objetos, o dicho de otro modo, los objetos tienen propiedades que heredan de la categoría a la que pertenecen. El uso de categorías en esquemas de representación se observa claramente en las redes semánticas, donde se puede visualizar gráficamente una base de conocimiento, lo mismo que en los marcos.

Siguiendo con el planteamiento de Russell y Norvig en [38], la representación del conocimiento considera varios aspectos y conceptos del dominio sobre el cual se tiene conocimiento. Estos aspectos y conceptos son: Las acciones, las situaciones y eventos. Las situaciones son estados resultantes de aplicar acciones a un estado precedente. Los eventos, por su parte, se refieren a una acción o un conjunto de acciones que tienen una duración, un principio y fin con respecto al tiempo. Por ello, la ocurrencia de un evento es localizada como un punto en el tiempo. Sin embargo, se denomina evento, en forma general, a la abstracción de un segmento espacio-temporal del mundo real, es decir que la abstracción incluye tanto a las acciones, como a las localizaciones, los cambios que resultan de las acciones, el tiempo y los objetos físicos.

De manera que un dominio simple o complejo determina el tipo de representación a utilizar, como por ejemplo, la lógica de predicados (LP) utilizada para tratar el contenido y la organización del conocimiento, pero existen ciertos aspectos del mundo real que son difíciles de capturar en LP. La dificultad radica en que casi todas las generalizaciones tienen excepciones, o son ciertas sólo en determinado grado. La habilidad para manejar excepciones o incertidumbre es extremadamente importante. O en el caso de las redes semánticas y el razonamiento distribuido al tratar de pasar por todos los estados cognitivos conlleva la dificultad de las numerosas extensiones para lograr la representación, además de su interpretación.

Nuestro caso de estudio está situado en el *razonamiento con incertidumbre y procesamiento paralelo distribuido*. En el siguiente capítulo se abarca la definición de estos tipos de razonamiento y las técnicas utilizadas para su representación.

Capítulo 3

EL RAZONAMIENTO Y LA TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE

Procesamiento Distribuido y Paralelo, y los Mapas Cognoscitivos Difusos

En este capítulo se describen las principales teorías en las que se basan las técnicas de representación capaces de tratar el conocimiento y el razonamiento en condiciones de incertidumbre. Estas teorías son: La Teoría de la probabilidad, la teoría de evidencia y la teoría de la posibilidad.

En este capítulo se describe lo que es el procesamiento distribuido y paralelo y, con detalle, lo que son los mapas cognoscitivos difusos (MCDs) y la razón por la que preferimos utilizar esta técnica. Además se describe el álgebra causal difusa como herramienta para modelar la incertidumbre, misma que permite entender los principios de razonamiento de los MCDs.

INTRODUCCIÓN

Los primeros sistemas expertos de la década de 1970 usaron razonamiento estrictamente lógico pero esto resultó poco práctico para la mayoría de los dominios del mundo real donde el conocimiento que se tiene de él es incierto. El razonamiento, frente a un conocimiento incierto del mundo real, genera grados de creencias, en lugar de certezas, acerca de las oraciones relevantes que del mundo real se hagan. La presencia de incertidumbre cambia radicalmente el modo en que se toman decisiones, es decir, que una acción puede seleccionarse o rechazarse dependiendo no solo del objetivo sino también de las consecuencias de tal decisión [38].

Por lo anterior, el proceso de toma de decisiones bajo incertidumbre requiere de analizar la mejor metodología para manejar dicha incertidumbre en condiciones de riesgo de acuerdo a la naturaleza del problema porque de otra manera, se podría llegar a generar inferencias inexactas [14, 37]. A continuación se describen las principales técnicas.

3.1 TÉCNICAS PARA EL MANEJO DE LA INCERTIDUMBRE

Las principales teorías en las que se basan las técnicas para manejar la incertidumbre son:

- a) Teoría de la probabilidad
- b) Teoría de la evidencia
- c) Teoría de la posibilidad

a) TEORÍA DE LA PROBABILIDAD

Depende de la experiencia y está basada en el denominado teorema de Bayes donde el razonamiento permite calcular la probabilidad inversa P(Hipótesis/Evidencias), en lugar de la probabilidad original P(Evidencias/Hipótesis). El teorema de Bayes (8) proviene de la probabilidad condicional P(H/E) la cual está dada por:

$$P(H/E) = P(H \cap E) / P(E) = P(H \& E) / P(E) \quad (1)$$

donde H y E son dos eventos y $P(H \cap E)$ denota la ocurrencia conjunta de los eventos H & E. Análogamente,

$$P(E/H) = P(E \& H) / P(H) \quad (2)$$

de (1) obtenemos, $P(H \& E) = P(H/E) \cdot P(E)$ (3)

de (2) obtenemos, $P(E \& H) = P(E/H) \cdot P(H)$ (4)

como, $P(E \& H) = P(H \& E)$ (5)

sustituyendo a (3) en (5) tenemos, $P(E \& H) = P(H/E) \cdot P(E)$ (6)

de (6) obtenemos, $P(H/E) = \frac{P(E \& H)}{P(E)}$ (7)

sustituyendo a (4) en (7) tenemos, $P(H/E) = \frac{P(E/H) \cdot P(H)}{P(E)}$ (8)

De manera que extendiendo el teorema de Bayes, es posible obtener la probabilidad para cada uno de los eventos que conforman el caso de estudio por medio de (9), ver [14].

$$P(H_j/E_i) = \frac{P(E_i/H_j) \times P(H_j)}{\sum_{k=1}^n P(E_i/H_k) \times P(H_k)} \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n \quad (9)$$

En el mundo real, sin embargo, la hipótesis H_j depende de un número de E_i s. Por lo tanto:

$$P(H_i/E_1, E_2, \dots, E_m) = \frac{P\{(E_1, E_2, \dots, E_m)/H_j\} \times P(H_j)}{\prod_{k=1}^n P\{(E_1, E_2, \dots, E_m)/H_k\} \times P(H_k)} \quad (9.1)$$

Cuando las E_i s son independientes, se puede escribir,

$$P(E_1, E_2, \dots, E_m/H_j) = P(E_1/H_j) \times P(E_2/H_j) \times \dots \times P(E_m/H_j) = \prod_{i=1}^m P(E_i/H_j) \quad (9.2)$$

Substituyendo (9.2) en (9.1) tenemos:

$$P(H_j/E_1, E_2, \dots, E_m) = \frac{\prod_{i=1}^m P(E_i/H_j) \times P(H_j)}{\prod_{k=1}^n \left\{ \prod_{i=1}^m P(E_i/H_k) \right\} \times P(H_k)} \quad (9.3)$$

Ejemplo: Para ilustrar el proceso de razonamiento usando la expresión (9.3), se considera el espacio de hipótesis y el espacio de evidencia para un problema de diagnóstico médico. Las reglas, que representan la relación de causa-efecto entre el espacio de evidencia y el espacio de hipótesis, también son proporcionadas junto con las probabilidades condicionales.

El diagnóstico médico determina la probable enfermedad que el paciente padece.

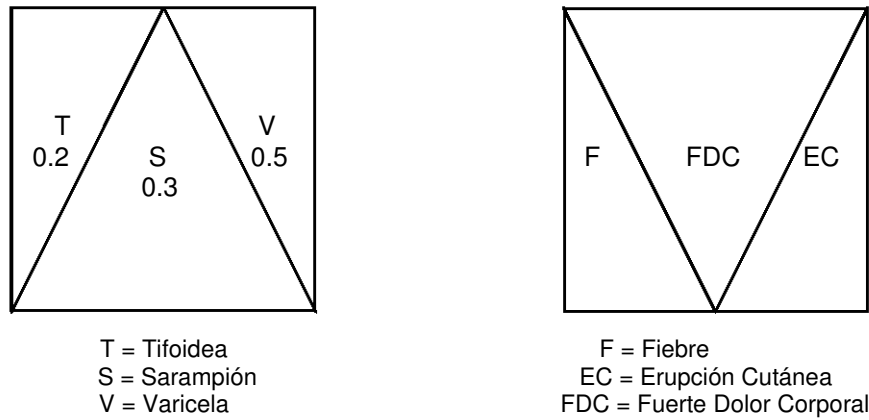


Fig. 3.1. Espacio de la hipótesis y la evidencia del ejemplo

Como se puede ver en la Figura 3.1,

$$\begin{aligned}
 P(T) &= 0.2, \\
 P(V) &= 0.5, \\
 P(S) &= 0.3
 \end{aligned}$$

donde $P(X)$ denota la probabilidad que un paciente tenga la enfermedad X .

Conjunto de reglas:

Regla 1: Si los síntomas son

$$F \quad (P(F/T) = 0.9),$$

$$FDC \quad (P(FDC/T) = 0.6)$$

ENTONCES se espera que el paciente padezca de T.

Regla 2: Si los síntomas son
 $F (P(F/S) = 0.8)$,
 $EC (P(EC/S) = 0.7)$
 $FDC (P(FDC/S) = 0.8)$
 ENTONCES se espera que el paciente padezca de S.

Regla 3: Si los síntomas son
 $F (P(F/V) = 0.6)$,
 $EC (P(EC/V) = 0.9)$
 $FDC (P(FDC/V) = 0.8)$
 ENTONCES se espera que el paciente padezca de V.

Calculamos $P(V/EC, F, FDC)$, $P(T/F, FDC)$ y $P(S/EC, F, FDC)$ y encontramos la cantidad más alta de ellos; de aquí obtenemos una conclusión a favor de la enfermedad con la probabilidad más alta. Ahora,

$$P(V/EC, F, FDC) = \frac{P(V)P(EC/V)P(F/V)P(FDC/V)}{\sum_{x \in \{V,S,T\}} P(F/x)P(FDC/x)P(x) \{P(EC/S) + P(EC/V)\}} \quad (9.4)$$

Análogamente, podemos calcular $P(S/EC, F, FDC)$ y $P(T/F, FDC)$. Es necesario hacer notar que el denominador de (9.4) es común a las tres probabilidades condicionales. De manera, que la evaluación de sus numeradores sólo es adecuado para comparación.

Ahora, $P(V).P(EC/V).P(F/V).P(FDC/V) = 0.5 \times 0.9 \times 0.6 \times 0.7 = 0.189$
 $P(S).P(EC/S).P(F/S).P(FDC/S) = 0.134$
 y $P(T).P(F/T).P(FDC/T) = 0.108$

De los resultados anteriores es claro que el paciente padece V. El sistema respondería al usuario, de la siguiente manera: *“Es altamente probable que el paciente padezca V para P(V/ eventos condicionales) es la cantidad más alta de las probabilidades condicionales competentes para otras enfermedades”*.

La limitación en este tipo de razonamiento es respecto a la incorporación de nuevas hipótesis, debido a que sería necesario redefinir, por parte de un equipo experto, a $P(H_j)$ para toda j tal que $1 \leq j \leq n+1$

b) TEORÍA DE LA EVIDENCIA

El formalismo Bayesiano asigna una creencia positiva, pero no toma en cuenta la no creencia de las proposiciones. En cambio, la teoría de la evidencia, creada por Dempster y Shafer, permite integrar tanto la creencia como la no creencia, es decir, trata la ambigüedad en la información lo que permite que la evidencia adquirida mediante observaciones o experimentaciones apoye al mismo tiempo varias conclusiones mutuamente excluyentes o ninguna conclusión en particular. [14, 37].

En el modelo que propone Dempster y Shafer [14], la creencia en una proposición es representada como un intervalo, denominado por ello, intervalo de creencia. Para ejemplificar este concepto, se considera el intervalo unidad $[0,1]$ y el intervalo de creencia que describe a la proposición A, como se muestra en la Figura 3.2,

donde,

Creencia (A)	es el grado con que la evidencia actual soporta a A. Subintervalo $[0, j)$.
NoCreencia (A)	es el grado con el que la evidencia actual soporta la negación de A ($\neg A$). Subintervalo $(k, 1]$.
Incertidumbre (A)	es el grado en que no creemos nada respecto de A, es decir, ni en A, ni en $\neg A$ de manera que conforme

nuevas evidencias sean recolectadas, la incertidumbre irá decreciendo. Subintervalo (j, k).

Además,

$$\text{Plausibilidad (A)} = \text{Creencia (A)} + \text{Incertidumbre (A)}$$

$$\text{Duda (A)} = \text{NoCreencia (A)} + \text{Incertidumbre (A)}$$

Esto muestra que:

- 1) Plausibilidad (A) \geq Creencia (A)
- 2) Plausibilidad (A) + Plausibilidad (\neg A) \geq 1
- 3) Creencia (A) + Creencia (\neg A) \leq 1

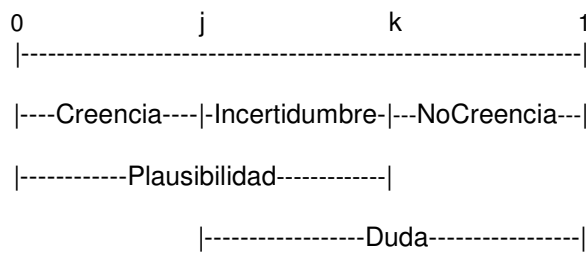


Fig. 3.2. El intervalo de creencia

En la teoría de la evidencia se denomina como marco de discernimiento (MDD) Θ al conjunto de todos los resultados posibles de un experimento aleatorio. Por ejemplo, en una tirada de un dado, el conjunto de resultados descrito como "El número mostrado es i " para $1 \leq i \leq 6$, se define como MDD $\Theta = \{ 1, 2, 3, 4, 5, 6 \}$.

Además, las probabilidades se asignan a subconjuntos de Θ , a diferencia de la teoría Bayesiana, donde las probabilidades pueden asignarse a elementos individuales (subconjuntos simples). De manera que la asignación de probabilidad básica (APB) está definida como la función resultante que a partir de una fuente de conocimiento de evidencias, asigna probabilidades a las proposiciones, representadas por subconjuntos de Θ . Formalmente, una APB es m ,

$$\text{donde } m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$$

$$0 \leq m(\cdot) \leq 1.0, m(\Phi) = 0$$

$$\text{y } \sum_{x \subseteq \Theta} m(x) = 1.0$$

La función de creencia $Cre(x)$ sobre Θ , está definida como:

$$Cre(x) = \sum_{Y \subseteq X} m(Y)$$

De manera que, por ejemplo, si el MDD Θ contiene los subconjuntos A, C y D mutuamente excluyentes, entonces:

$$Cre(\{A, C, D\}) = m(\{A, C, D\}) + m(\{A, C\}) + m(\{A, D\}) + m(\{C, D\}) + m(\{a\}) + m(\{c\}) + m(\{d\})$$

La suma ortogonal de la creencia está definida como $m = m_1 \oplus m_2$.

Por ejemplo, tenemos dos fuentes de conocimiento BC1 y BC2 cuyos MDD son Θ_1 y Θ_2 respectivamente. Sean $m_1(.)$ y $m_2(.)$ las APBs de los subconjuntos de Θ_1 y Θ_2 respectivamente. La nueva APB, $m(.)$ puede calcularse basándonos en $m_1(.)$ y $m_2(.)$ por medio de:

$$m(X) = K \sum_{X = X_i \cap X_j} m_1(X_i) \cdot m_2(X_j)$$

$$y K = 1 - \sum_{X_i \cap X_j = \Phi} m_1(X_i) \cdot m_2(X_j)$$

donde X_i y X_j son los elementos focales de Θ_1 y Θ_2 respectivamente. Los elementos focales son los subconjuntos de Θ en los cuales la probabilidad no es cero.

c) TEORÍA DE LA POSIBILIDAD

Basada en los conjuntos difusos, consiste en la lógica difusa creada por Zadeh, la cual pondera la vaguedad en la información, dándole grados de posibilidad a un evento determinado y cómo éste influye sobre otros que intervienen en el análisis del problema a resolver. Esta teoría ha sido probada exitosamente en el razonamiento con datos inexactos y conocimiento incompleto, por ello fue ampliamente explotado por los japoneses en procesos de control industrial, en diagnósticos, fotografía, etc. surgiendo, de esta manera, la llamada lógica difusa de control. [14, 30, 37].

Conjuntos difusos

En la teoría convencional de conjuntos, un elemento de un conjunto universal (U) puede o no pertenecer a un determinado conjunto S. Lo anterior significa que el grado de membresía de un elemento al conjunto S es 0 (no pertenece) ó 1 (sí pertenece), porque se tiene la certeza para identificar esta pertenencia, como se ejemplifica en la Figura 3.3.

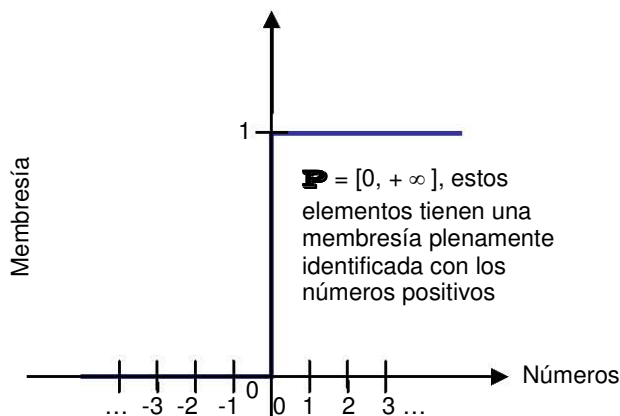


Fig. 3.3. Conjunto convencional

En cambio, en el caso de los conjuntos difusos, éstos representan conjuntos cuyos elementos presentan grados de membresía dentro del intervalo cerrado $[0, 1]$, tal como se ejemplifica en la Figura 3.4.

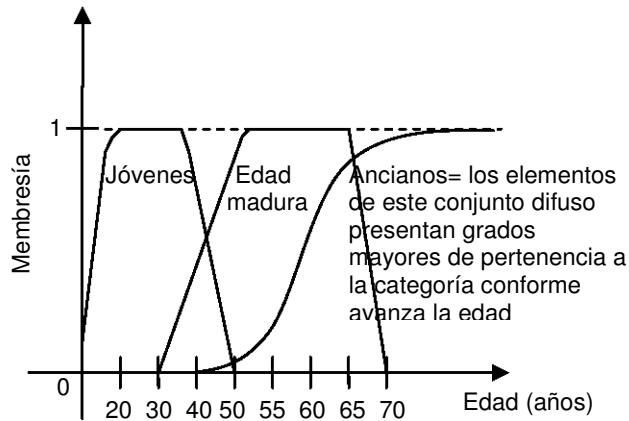


Fig. 3.4. Conjunto Difuso

Lógica difusa

Para modelar un sistema físico, donde se tienen variaciones de los parámetros de entrada y de salida, se pueden establecer relaciones difusas entre los de entrada y salida. Por ejemplo, consideremos los conjuntos difusos siguientes:

$$\text{Ancianos} = E_j/\mu_j = \{E_1/\mu_1, E_2/\mu_2, \dots, E_n/\mu_n\} = \{50/0.1, 55/0.2, 60/0.6, 65/0.8, 70/0.9\}$$

donde, μ_j representa, en el conjunto Ancianos, el grado de membresía de la edad E_j (para $j=1, 2, 3, \dots, n$).

La membresía de un elemento también puede representarse como: $\mu_{50}=0.1$.

$$\text{Pérdida parcial de memoria} = P_k/\mu_k = \{P_1/\mu_1, P_2/\mu_2, \dots, P_n/\mu_n\} = \{10/0.1, 20/0.5, 30/0.6, 40/0.8, 50/0.9\}$$

donde, μ_k representa, en el conjunto Pérdida parcial de memoria, el grado de membresía del porcentaje de pérdida P_k (para $k=1, 2, 3 \dots, n$).

Podemos establecer una relación difusa entre el conjunto difuso Ancianos y el conjunto difuso Pérdida parcial de memoria, de manera que se modela un sistema como el de la Figura 3.5

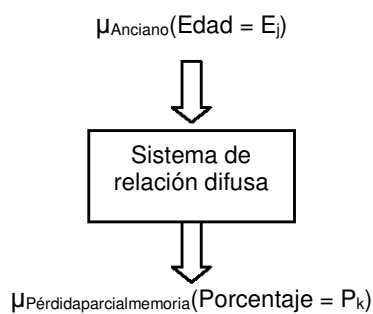


Fig. 3.5. Sistema difuso que relaciona $\mu_{\text{Pérdidaparcialmemoria}}(\text{Porcentaje} = P_k)$ con $\mu_{\text{Anciano}}(\text{Edad} = E_j)$

La relación obtenida a través del producto cartesiano se puede indicar como $\mu_R(\text{Edad}, \text{Porcentaje})$. Esta relación se ilustra mediante la matriz relacional de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Matriz relacional

Edad % - mem.	20	30	40	50	55	60	65	70
10	0*0.1	0*0.1	0*0.1	0.1*0.1	0.2*0.1	0.6*0.1	0.8*0.1	0.9*0.1
20	0*0.5	0*0.5	0*0.5	0.1*0.5	0.2*0.5	0.6*0.5	0.8*0.5	0.9*0.5
30	0*0.6	0*0.6	0*0.6	0.1*0.6	0.2*0.6	0.6*0.6	0.8*0.6	0.9*0.6
40	0*0.8	0*0.8	0*0.8	0.1*0.8	0.2*0.8	0.6*0.8	0.8*0.8	0.9*0.8
50	0*0.9	0*0.9	0*0.9	0.1*0.9	0.2*0.9	0.6*0.9	0.8*0.9	0.9*0.9

La operación “*” en la matriz relacional de la Tabla 3.1, puede realizarse con diferentes funciones. Zadeh, por ejemplo, utilizó la operación difusa AND (min) para representar la función de implicación. Cuando “*” denota el operador difuso min, entonces se puede formalizar como sigue:

$$a_i * b_j = a_i, \quad \text{si } a_i < b_j \text{ y}$$

$$a_i * b_j = b_j, \quad \text{si } b_j \leq a_i$$

Por lo anterior, la matriz relacional se reduce a la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Matriz relacional reducida

Edad % - mem.	20	30	40	50	55	60	65	70
10	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
20	0	0	0	0.1	0.2	0.5	0.5	0.5
30	0	0	0	0.1	0.2	0.6	0.6	0.6
40	0	0	0	0.1	0.2	0.6	0.8	0.8
50	0	0	0	0.1	0.2	0.6	0.8	0.9

A partir de la matriz se pueden establecer reglas de distribución de membresía del tipo:

Si “Edad” entonces “% de pérdida de memoria”

También se puede utilizar la operación difusa OR (max) para representar la función de implicación. De manera que la formalización quedaría como sigue:

$$a_i + b_j = a_i, \quad \text{si } a_i > b_j \text{ y}$$

$$a_i + b_j = b_j, \quad \text{si } b_j \geq a_i$$

Lógica difusa de control

La lógica difusa de control es una metodología para la construcción de sistemas de control en los que las correspondencias entre las entradas real valuadas y los parámetros de salida están representadas por reglas difusas [38]. Los críticos indican que este tipo de control debe su éxito a sus pequeñas bases de reglas y a que están realizados con operadores difusos (* y +), lo que le da simplicidad. La clave es encontrar la manera de especificar una función real valuada en forma concisa e intuitiva.

3.2 MAPAS COGNOSCITIVOS DIFUSOS

La lógica difusa de control está muy cercana al espíritu de los expertos y se conoce como control basado en inteligencia artificial (*sección 1.3*). Una vertiente de esta teoría son los MCDs.

Los MCDs constituyen un nuevo enfoque al modelo del comportamiento y operación de sistemas complejos. Fueron introducidos por Bart Kosko en 1986 para describir el comportamiento de un sistema en términos de conceptos y relaciones causales entre dichos conceptos [16, 17, 23, 40].

Los MCDs parten de un modelo cognoscitivo, dicho modelo constituye la representación de un sistema cognoscitivo.

La palabra cognoscitivo tiene relación con el proceso de cognición. Este proceso se refiere a actividades mentales que: 1) lidian con información abstracta que provienen del mundo real, 2) su representación, y 3) la forma en que se tiene acceso a esta información desde la memoria.

Por lo anterior, un sistema cognoscitivo debe dar un marco que una los *disjecta membra* de los fragmentos y partes de nuestro conocimiento, formando una unidad cohesionada. Un sistema cognoscitivo debe ser un cuerpo de información *estructurado*, organizado en consonancia con principios taxonómicos y explicativos que unan esa información en un todo coordinado con bases racionales. Las categorías funcionales que gobiernan esta empresa de organización son las del entendimiento, la explicación y la racionalización cognoscitiva [36].

Es por medio de la sistematicidad que un modelo cognoscitivo logra representar las relaciones de causalidad que guardan entre sí los componentes que conforman un sistema.

Un sistema cognoscitivo logra simular la realidad, adaptándose a ella en relación a objetivos. Tal simulación es posible porque sistemas distintos pueden organizarse para mostrar un comportamiento casi idéntico [39].

La simulación puede ofrecer conocimiento nuevo a través de dos vías relacionadas entre sí: La más obvia es que, aún disponiendo de premisas correctas, descubrir lo que éstas implican puede resultar verdaderamente difícil (debemos desentrañar dolorosa y faliblemente las consecuencias de nuestras hipótesis). Es característico de muchos tipos de problemas de diseño que su sistema interno esté formado por componentes cuyas leyes de comportamiento fundamentales son bien conocidas. La dificultad del problema suele consistir, en realidad, en predecir cómo se comportará la interacción de tales componentes. La cuestión más interesante y sutil es si una simulación puede sernos de ayuda cuando, de entrada, no sabemos mucho acerca de las leyes naturales que gobiernan el comportamiento del sistema interno.

El objetivo, por tanto, de un modelo cognoscitivo es desarrollar una efectiva simulación de la solución del problema en un determinado dominio desde el punto de vista del humano. En esta técnica el conocimiento se divide en componentes que guardan una relación directa con la forma en que el humano los clasifica y los utiliza [18].

Particularmente, los mapas cognoscitivos proceden de la teoría del aprendizaje de signos [15, 8] de Edward C. Tolman (1886-1956), quien en su análisis de la conducta del hombre, considera el aprendizaje como la interconexión de conceptos que de alguna manera se relacionan entre sí, donde el cerebro del educando se considera como una sala de control de mapas donde éstos se reorganizan constantemente a fin de producir nuevas respuestas de conducta (cogniciones).

A su vez y por otro lado, la lógica difusa, nos provee de los MCDs, que son estructuras de grafos difusos utilizados para representar razonamiento causal y que han sido empleados en sistemas controlados computacionalmente y que también sirven para representar el conocimiento de un experto.

En 1932 Tolman, argumenta en [41], que los organismos aprenden las relaciones entre estímulos anteriores, respuestas y consecuencias de tal forma que permite a la conducta ocurrir cuando los eventos ambientales apropiados coinciden con estado emocional o demanda para cierta consecuencia. Tolman consideraba que la conducta como tal es un fenómeno *emergente* que tiene propiedades descriptivas y definitorias por sí mismas y a estas propiedades se les considera de *propósito y cognición*.

El aprendizaje de signos de Tolman.

La teoría de Edward C. Tolman se denominó conductismo propositivo en su principal trabajo sistemático, conductismo propositivo en animales y en el hombre (1932) [15, 41],

más tarde el propio autor y otros investigadores le llamaron teoría de signo Gestalt o de la esperanza.

La idea principal de Tolman, consiste en proponer que la conducta está dirigida a una meta, es dócil y varía de acuerdo a las circunstancias ambientales en la búsqueda de una meta dada.

Propone además que la conducta parece dirigirse a una meta, como acercarse o alejarse de algo. La conducta actual está guiada por lo que el sujeto cree que será su consecuencia o resultado, a esto le llama esperanza, por ejemplo: el gato salta tratando de salir de la caja, el carpintero golpea un clavo tratando de reparar una silla y el profesor intenta enseñar una habilidad a su alumno.

Otra idea de Tolman es que los organismos adquieren conocimientos acerca de su medio ambiente, en donde están localizadas sus metas importantes, y de la forma de ir de un lugar a otro. La unidad de conocimiento es la relación entre dos o mas eventos de estímulo o entre un estímulo, y una respuesta a él, de la forma estímulo respuesta.

También argumenta que los que los sujetos utilizan son objetos ambientales y desarrollan objetos medios para llegar a su meta, a lo anterior lo considera como sinónimo de cogniciones. Se refiere al tiempo de aprendizaje factor que es central para la conducta. En otras palabras el organismo *aprende qué conduce a qué*.

Otro de sus argumentos es el de la docilidad o manejabilidad de la conducta, solo en el caso de que la conducta provenga de un acto reflejo es considerada fisiológica. La docilidad está en términos de aprendizaje, esto es, el organismo aprende qué respuesta ejecutar con el fin de alcanzar su objetivo. Con base en lo anterior elegirá el camino más corto hacia su objetivo. De acuerdo a Tolman, docilidad es, ensayos de selección de la respuesta adecuada para la consecución de la meta.

Por lo anterior se concluye que la conducta es cognoscitiva por naturaleza. Tolman define así *las conexiones o disposiciones medios-fin* (aprendizaje: de qué conduce a qué), como la existencia de *creencias*, de que:

1. si se reacciona mediante un caso de este tipo de respuesta a un caso de este tipo de situación (estímulo) ENTONCES
 - a. tendremos un caso de situación-estímulo anterior o un caso de situación-estímulo.

Además las creencias y disposiciones se almacenan juntas (en el sistema nervioso). Cuando se les activa en forma de expectativas tienden a interactuar y a consolidarse entre sí.

Otra propuesta de Tolman radica en la suposición de que el pensamiento de los seres humanos no es en esencia más que una interacción activada entre las expectativas en relación con las nuevas disposiciones medios-fin.

Finalmente para Tolman existían dos construcciones cognoscitivas importantes: 1) las disposiciones medios-fin, y 2) las esperadas.

Los anteriores párrafos nos llevan a coincidir con la última propuesta de Konar [15] en la que nos resalta la importancia de los modelos conceptuales provenientes del procesamiento distribuido paralelo (PDP).

Procesamiento paralelo distribuido

La llegada del procesamiento paralelo distribuido (PDP), por los investigadores Rumelhart, McClelland y sus asociados abren una nueva frontera en el aprendizaje maquina. A diferencia de los otros modelos de memoria cognoscitivos, el acercamiento PDP descansa sobre las características del comportamiento de una sola neurona celular.

Los partidarios del PDP, consideran que el sistema cognoscitivo es una estructura organizada de neuronas, las cuales juntas conforman una red neuronal. Tal red tiene una inmensa capacidad de aprendizaje y de almacenamiento de información y conocimiento para su uso subsecuente.

Esta corriente puede explicar el comportamiento de la memoria cognoscitiva, pero no puede explicar las perspectivas psicológicas de la cognición. Por ejemplo no puede hacer una diferencia entre la MLA y la MCA, aunque evidencias experimentales soporten su coexistencia. *Aún con lo anterior esta corriente tiene un significado especial en la simulación de la cognición en las máquinas.* Las características fundamentales de esta corriente son:

- Es un trabajo pionero en cognición al ver la memoria biológica como una colección distribuida de únicas neuronas celulares que pueden ser entrenadas de forma paralela cada vez.
- Demuestra la posible realización de cognición en máquinas.
- Para entradas similares de patrones la red neuronal puede tener respuestas similares. Mientras que para entradas de patrones con suficientes diferencias, las respuestas son suficientemente diferentes.

Esta es una observación significativa que nos lleva a una nueva clase de reconocimiento de patrones por aprendizaje supervisado. En esta clase de aprendizaje existe un entrenamiento que proporciona la salida deseada para un conjunto dado de patrones de entrada.

- El PDP, *satisface el direccionamiento del contenido de la memoria (content addressable memory)*, más que el direccionamiento de la memoria.

En computadoras convencionales se localiza la información utilizando acceso aleatorio donde encontramos el contenido, una vez que la dirección es localizada. Pero en el cerebro biológico los humanos algunas veces recuerdan parte de una información y a partir de esta se trae el TODO, después de un rato. Traer toda la información a partir de una parte, se hace usualmente por *satisfacción del contenido de la memoria (content addressable memory)*.

Imaginación mental

¿Cómo es que las personas recuerdan las escenas? Puede ser que estén representadas en forma de imágenes en el cerebro. A la representación de escenas informalmente se le conoce como *imaginación mental en ciencias cognoscitivas*.

Por otro lado se encuentran los *mapas cognoscitivos* que denotan relaciones espaciales entre objetos. Por ejemplo las personas se hacen una idea de las distancias entre dos puntos con base en sus mapas cognoscitivos internos. *En IA tienen un significado más amplio, son redes capaces de adquirir, aprender, codificar y decodificar conocimiento/información.*

Mapas cognoscitivos

Los mamíferos desarrollan razonamiento basándose en estructuras especializadas llamadas mapas cognoscitivos, localizados en la región del hipocampo de su cerebro.

En el campo de inteligencia artificial, los mapas cognoscitivos tienen un significado más amplio, *ellos incluyen la codificación del conocimiento con respecto a eventos causales y la forma en la que es activada.* Modelar mapas cognoscitivos utilizando lógica difusa parece natural, debido a la inherente incertidumbre que se encuentra en las bases de datos y conocimiento del mundo real.

En este trabajo nos referiremos a los MCDs, como representaciones causales entre conocimiento/datos para representar relaciones de eventos. Por ejemplo una alta en la

temperatura de un motor causa un severo daño en todo el sistema, en el caso de otros tipos de representación del conocimiento este tipo de causalidad no puede ser descrita ya que conllevan limitaciones cuando se trata de describir relaciones de causalidad.

Los MCDs han sido recién introducidos por Bart Kosko, quien le da significado a esta nueva representación como un grafo capaz de codificar conocimiento empleando lógica difusa. A continuación se presenta una breve explicación de diferentes modelos de MCDs, para así llegar a la descripción del MCD utilizado para modelar el proceso de razonamiento del trabajo objeto de estudio.

Mapa cognoscitivo de Axelrod

Axelrod introduce los mapas cognoscitivos (MC) en 1970 con el fin de representar conocimiento científico social. Estos MC son grafos dirigidos con signo, donde los nodos denotan conceptos tales como: inestabilidad social y la dirección de los arcos denota conexiones causales. Los arcos van acompañados de un signo positivo o negativo que denota un incremento o disminución respectivamente. Por ejemplo en el caso de un arco positivo (negativo) del nodo A al nodo B, implica que A causalmente incrementa (disminuye) al nodo B.

Además empleó una matriz de adyacencia para representar a los MC. Dejemos que e_{ij} sea un arco que describe la relación causal entre los conceptos de c_i hacia c_j .

Entonces:

- $e_{ij} : 1$, si c_i causa incremento a c_j
- $e_{ij} : -1$, si c_i causa decremento a c_j
- $e_{ij} : 0$, si c_i no involucra causalidad a c_j .

y así para el MC de la Figura 3.6 tenemos una matriz de adyacencia representada en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Matriz de adyacencia E del MC de la Figura 3.6.

Desde/Para	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0	-1	1	0	0	0
C2	0	0	0	1	0	0
C3	0	0	0	0	1	0
C4	0	0	0	0	0	-1
C5	0	0	0	-1	0	-1
C6	0	0	0	0	0	0

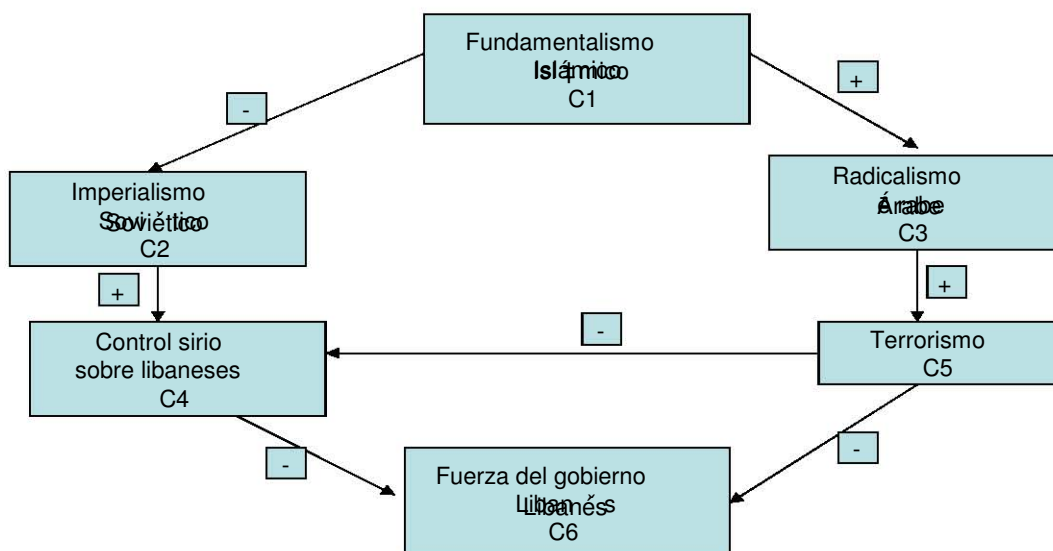


Fig. 3.6. Mapa Cognoscitivo que describe las relaciones políticas de la paz en Medio Oriente

Una pregunta que nos llega naturalmente es la siguiente: ¿de qué nos sirve la matriz de adyacencia E? Supongamos que deseamos saber cuál es el efecto de los nodos C1 y C4, en este caso lo que debemos hacer es multiplicar el vector donde aparezca un uno en estos nodos [1 0 0 1 0 0] por la matriz E.

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

C1 C2 C3 C4 C5 C6

Entonces

$$CE = [0 \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad -1]$$

C1 C2 C3 C4 C5 C6

Este resultado indica el efecto de C1 en C2 y C3, y el efecto de C4 en C6.

Mapa cognoscitivo de Kosko

Kosko formaliza la relación de la causalidad proponiendo un MCD. Uno de los objetivos al incluir la lógica difusa es satisfacer una relación dirigida de forma parcial con respecto al operador \leq entre dos nodos. Así que de acuerdo a este autor tenemos:

C_i = un concepto

Q_i = a un conjunto de etiquetas lingüísticas (mucho C_i , mas o menos C_i , etc.) para C_i

Entonces para dos conceptos C_i y C_j , C_i causa C_j ssi

1. $Q_i \subset Q_j$ y $\neg Q_i \subset \neg Q_j$
2. $Q_i \subset \neg Q_j$ y $\neg Q_i \subset Q_j$

En el caso de la regla 1, la causalidad de C_i incrementa C_j . Y en la regla 2, la causalidad de C_i disminuye C_j .

Ahora supongamos que deseamos expresar el siguiente conocimiento:

1. de forma amplia el fundamentalismo islámico incrementa el fundamentalismo masivo árabe.
2. de forma amplia el fundamentalismo islámico causa una severa caída en el imperialismo árabe.

Bien consideremos etiquetas lingüísticas para expresar esto tomando en consideración las anteriores reglas. Por ejemplo deje que el siguiente conjunto

$P = \{ \text{ninguno} \leq \text{algo} \leq \text{mucho} \leq \text{demasiado} \}$, sea un conjunto ordenado de etiquetas para los arcos. Entonces para el mapa de la Figura 3.7 encontramos el efecto causal de C_1 sobre C_5 , en este caso el efecto se da a través de 3 caminos.

1. $C_1 - C_2 - C_4 - C_5$
2. $C_1 - C_3 - C_5$
3. $C_1 - C_3 - C_4 - C_5$

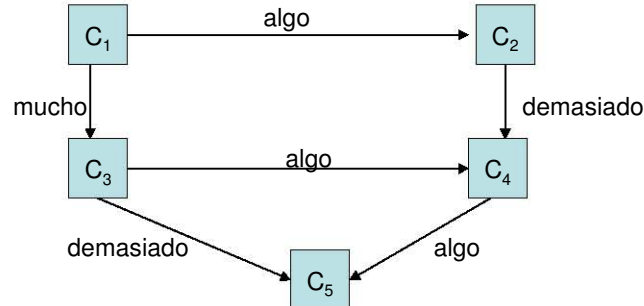


Fig. 3.7. Mapa cognoscitivo con etiquetas difusas en los arcos

En este caso el efecto causal es determinado tomando en consideración el valor mínimo de las etiquetas que conforman cada uno de los tres caminos.

- | | | | |
|----------------------------|---|--|------------------|
| 1. $C_1 - C_2 - C_4 - C_5$ | $\text{Min} \{ e_{12}, e_{24}, e_{45} \}$ | $= \{ \text{algo}, \text{demasiado}, \text{algo} \}$ | $= \text{algo}$ |
| 2. $C_1 - C_3 - C_5$ | $\text{Min} \{ e_{13}, e_{35} \}$ | $= \{ \text{mucho}, \text{demasiado} \}$ | $= \text{mucho}$ |
| 3. $C_1 - C_3 - C_4 - C_5$ | $\text{Min} \{ e_{13}, e_{34}, e_{45} \}$ | $= \{ \text{mucho}, \text{algo}, \text{algo} \}$ | $= \text{algo}$ |

Y finalmente para determinar el efecto total de C_1 sobre C_5 , tomamos el valor máximo de los tres caminos que en este caso es mucho. Lo que significa que C_1 imparte mucha causalidad a C_5 .

En este modelo se busca encontrar el máximo beneficio de cada una de las aristas del camino al menor costo posible (por lo general, el camino más corto o con menor número de aristas) que garantiza la obtención del camino óptimo (que es la mejor solución al problema). Este problema también puede ser visto como un caso especial del problema de transporte de la Investigación de Operaciones.

Mapa cognoscitivo de Kosko extendido

Kosko extendió el modelo básico de Axelrod incluyendo una función no lineal. En este caso dejemos que $E_{(n \times n)}$ represente a la matriz de incidencia de un mapa cognoscitivo y que C , sea un vector dado del estado del sistema en un instante dado. En este caso C_i , que es el i -ésimo componente del vector C , denota la fuerza del concepto, de aquí que el siguiente vector de estado pueda ser evaluado como:

$$C(t+1) = S [C(t) * E]$$

Donde:

S : es una función no lineal aplicada de forma individual sobre los componentes del producto de la matriz.

t : denota el tiempo

hay que tener en consideración que la inclusión de la no linealidad, algunas veces fuerza al mapa cognoscitivo a reciclarse a través de los estados.

Supongamos la matriz de adyacencia de la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Matriz de adyacencia de un mapa cognoscitivo

Desde/Para	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0	1	0	-1	0
C2	0	0	1	0	-1
C3	0	-1	0	1	-1
C4	1	0	-1	0	1
C5	-1	1	0	-1	0

Ahora sea S una función no lineal de tipo binario, donde:

$$\begin{aligned} S(a) &= +1 \quad \text{para } a > 0 \\ S(a) &= 0 \quad \text{para } a \leq 0 \end{aligned}$$

Entonces para un estado inicial encontramos un estado límite de comportamiento a través de los siguientes estados:

$$\begin{aligned} C_1 - C_5 &= (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \\ C_2 &= (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) \\ C_3 &= (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0) \\ C_4 &= (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0) \\ C_1 - C_5 &= (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \end{aligned}$$

En este caso al incluir la función no lineal estamos acotando la distribución de los valores de salida e intentando que sea la misma que los valores de entrada, en este caso nos referimos al *desempeño del razonamiento*, en otras palabras, al mismo tiempo se está dotando al mapa cognoscitivo con una auto evaluación, en el sentido de saber qué tan bien se razona con respecto al diseño de los enlaces de la matriz de adyacencia. Existen diferentes tipos de funciones como la logística, la tangente hiperbólica, el arco seno, o el arco tangente entre otras [31]; y cada una de ellas de forma particular se adaptará a cada tipo de problema (razonamiento del proceso). Hay que hacer notar que la función logística es la mejor en el sentido que conlleva el aprendizaje-estadístico perfecto [44].

Mapas cognoscitivos con aprendizaje

Existen distintas versiones que incluyen aprendizaje, a continuación se da una breve explicación de ellos para un mayor detalle consultar [15], entre ellas un mapa cognoscitivo adaptable de Kosko, en este se propone un aprendizaje para los enlaces. Dejemos que e_{ij} sea el valor de la causalidad difusa del nodo i al nodo j , y que x_i y x_j sean los valores de reforzamiento de las señales de entrada de los conceptos c_i y c_j respectivamente y dejemos que S sea una función no lineal. Además incluye la ley del aprendizaje de Hebbian en los enlaces e_{ij} para adaptar el valor de causalidad a través de la siguiente ecuación.

$$e_{ij}(t+1) = (1-B) e_{ij}(t) + S(x_i) + S(x_j)$$

donde B es un término que hace que decaiga el valor difuso del arco, en otras palabras le quita la fuerza de definición borrosa y lo vuelve discreto. S es una función sigmoidea. Utiliza esta función con el fin de saber qué tan eficiente es el aprendizaje, de aquí que utilice la derivada en el tiempo, aunque la ecuación que se usa es la versión discreta.

Entonces para un enlace dado $e_{ij}(0)$, se puede iterar la expresión anterior hasta que el valor de e_{ij} se vuelva estable. Una vez que $e_{ij} = e_{ij}^*$, para toda i, j , el proceso termina. Para ejecutar la llamada del mapa cognoscitivo difuso se utiliza la ecuación del mapa cognoscitivo extendido de su propuesta anterior:

$$C(t+1) = S[C(t) * E]$$

Otro modelo que incluye aprendizaje es el modelo de Pal y Konar [15], el cual conlleva creencias difusas en los nodos y reforzamiento de los valores causales representados por los enlaces.

El modelo de Zhang, Chen y Bezdek, fue elaborado con el fin de incorporar la experticia de varios expertos. Los autores definen una lógica negativa, positiva y neutral, para variables difusas y discretas, en el caso de las variables discretas el conjunto de valores admitidos es $\{-1, 0, 1\}$ y en caso de las variables difusas el espacio de valores se mueve entre $[-1, 1]$. En ese caso los enlaces están etiquetados con dos valores (u, v) , donde u y v representan el valor mínimo y máximo del valor difuso del arco.

Estos autores categorizan su modelo en tres componentes:

1. el primero se refiere a la construcción del mapa cognoscitivo: aquí se fusiona la opinión de varios expertos, con el fin de determinar el par de valores difusos de los enlaces.
2. el segundo componente es la heurística para determinar el mejor camino entre dos elementos, buscando la mayor causalidad positiva con el mínimo efecto.
3. el tercero es la interpretación que se da al resultado de la segunda fase. Y así en el caso de un resultado $(-0.3, 0)$, la respuesta a: ¿te guste o no, existe un efecto causal positivo de x_i sobre x_j ? la respuesta es -0.3 .

Mapa cognoscitivo utilizado en el caso de estudio

En el caso de estudio, el MCD utilizado fue el de Kosko extendido, el cual, como ya se vio anteriormente (Mapa de Kosko extendido), es representado por un diagrama, en el que los nodos son conceptos que describen las principales características del proceso, y las aristas entre los nodos establecen las relaciones causales (positivas o negativas) entre los conceptos. Esta representación gráfica ilustra la influencia que cada uno de los conceptos tiene sobre el resto como se puede observar en la Figura 3.6 [23].

Los conceptos en un MCD toman valores que cambian en el tiempo y se originan en el sistema. Estos valores están dentro del intervalo $[0, 1]$; y los pesos de interconexión entre dichos conceptos, toman valores dentro del intervalo $[-1, 1]$, para mayor detalle consultar [13, 23]. La causalidad positiva implica una relación directamente proporcional entre uno y otro concepto, es decir, que si uno incrementa su posibilidad de presentarse el otro también se incrementa de manera proporcional, y si esta posibilidad disminuye en uno de ellos, entonces también disminuye la posibilidad del otro de manera proporcional; en cambio, la negativa implica una relación inversamente proporcional, es decir, que si la posibilidad de que se presente uno de ellos crece, entonces la posibilidad del segundo elemento decrece de forma proporcional; y en caso contrario, si la posibilidad de uno decrece entonces la posibilidad del segundo elemento crece en forma proporcional.

3.2.1 Razonamiento y álgebra causal

La estructura del MCD permite la propagación de la causalidad hacia delante y hacia atrás permitiendo que la base de conocimiento aumente al aumentar nodos y enlaces entre ellos. La causalidad está representada como una relación difusa entre los nodos. El MCD, en general, está representado por una matriz de relaciones denominada también como matriz de adyacencia, (E) cuyos elementos (e_{ij}) son la dimensión y el efecto de cada relación causal, es decir, el peso entre uno (C_i) y otro concepto (C_j) . De manera que el valor del peso 1 y -1 significan una relación totalmente positiva y totalmente negativa respectivamente; mientras que un 0 significa que no hay efecto causal entre ellos. El resto de los valores del intervalo $[1, -1]$ corresponden a diferentes niveles difusos de efecto causal (causalidad difusa). [13].

De acuerdo a Kosko, [15, 45] las relaciones de causalidad entre los nodos puede definirse como:

Causalidad positiva: C_i incrementa causalmente a C_j si y solo si $Q_i \subset Q_j$ y $\neg Q_i \subset \neg Q_j$,
Causalidad negativa: C_i decrementa causalmente a C_j si y solo si $Q_i \subset \neg Q_j$ y $\neg Q_i \subset Q_j$

donde, C_i = un concepto

Q_i = a un conjunto de etiquetas lingüísticas (mucho C_i , mas o menos C_i , etc.) para C_i

Además, la causalidad negativa puede ser definida en términos de una causalidad positiva, tal como se ejemplifica con las Figuras 3.8 y 3.9.

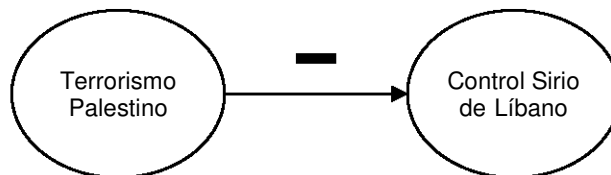


Fig. 3.8. Relación causal negativa.

Es equivalente a la relación positiva causal siguiente de la Figura 3.8.

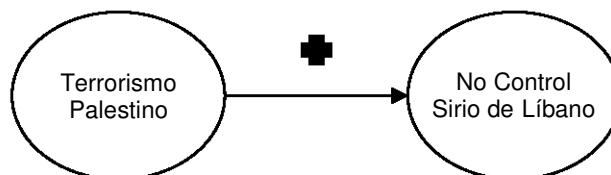


Fig. 3.9. Relación causal positiva.

Lo anterior, constituye la regla general de reemplazo en la construcción de un MCD y queda definida como:

$C_i \subset C_j$ con peso negativo puede reemplazarse por $C_i \subset \neg C_j$ con peso positivo, y viceversa.

Los MCDs son por tanto, dígrafos utilizados para representar el razonamiento causal. La parte difusa nos permite contar con grados de causalidad representados como enlaces entre los nodos de estos dígrafos.

Para este tipo de representación se ha desarrollado el álgebra causal que permite obtener el cálculo del efecto total de causalidad sobre un concepto C_i mediante las operaciones de multiplicación y adición [15, 23, 25, 40, 45], como se ejemplificó con el mapa cognoscitivo de la Figura 3.7.

3.2.2 Función umbral

El enfoque cualitativo de la matriz de relaciones nos permite observar el comportamiento general del sistema. Sin embargo, se debe hacer una cuantificación con respecto a la relación causal en el mapa definido previamente.

El estado de un nodo dado se obtiene de todos los nodos que lo afectan. Estos estados se multiplican por el peso de la arista entre los dos nodos y la suma se toma como entrada de una función umbral (dada por la Ec. 11), transmitiendo una entrada no acotada en una señal acotada, lo que permite comparar los nodos [17].

La suma de efectos de cada nodo (N_j para $j=1,2,3,\dots,n$; siendo n el número de nodos) y que se toma como entrada de una función umbral, se obtiene de acuerdo a la siguiente relación:

$$N_j = \sum_{k=1}^n (Ve_{j,k} M_{k,j}) \quad (10)$$

donde

$Ve_{j,k}$ es el vector de entrada (por ej. la tabla anterior)

$M_{k,j}$ es el valor de cada elemento de la matriz de relaciones (ej. Tabla 3.4)

n es el número de elementos

Se pueden usar diversas funciones umbral (binomial, trinomial, logística), en nuestro caso se utilizó la siguiente función señal logística [17,25]:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-\kappa x}} \quad (11)$$

donde:

$S(x)$ = Es la función logística y representa el estado futuro del vector de entrada.

X = Suma de efectos entre los nodos

K = Constante de escalamiento = 5 [25].

La razón por la que se elige la señal logística es que tratándose de una función sigmoideal proporciona una salida dentro de un rango continuo de 0 a 1. Además, presenta un comportamiento incremental o decremental dependiendo del valor que tome κ (positivo o negativo).

La función logística $S(x)$ se deriva del libro de Kosko de 1994 [4]. La curva de dicha función está centrada sobre los ejes x - y . Para valores negativos de k , el trazo de $S(x)$ va desde un máximo sobre el lado izquierdo a un mínimo sobre el lado derecho. Para valores positivos de k , los valores de $S(x)$ van desde un mínimo sobre el lado izquierdo hasta un máximo sobre el lado derecho. En la Figura 3.10 se muestra la gráfica de la función logística.

El $|k|$ más pequeño es el que extiende la curva simétricamente alrededor del punto $(0,0.5)$. Mientras que el $|k|$ más grande logra que la transición en la inclinación se de en $S(x) = 1/2$.

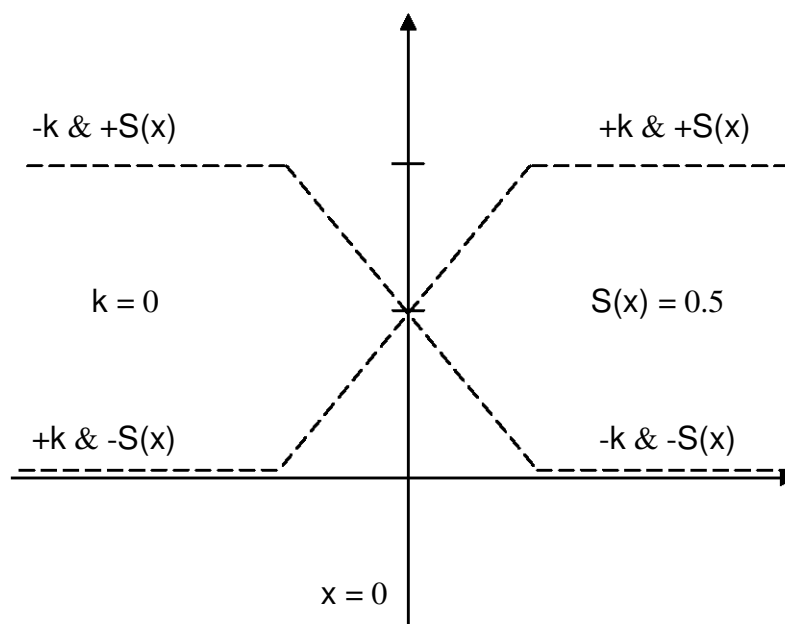


Fig. 3.10. Función Logística

S(x) Como función de k y su análisis

k cumple con el papel de detener el crecimiento exponencial que en principio tiene la función, por lo que equivale a una especie de amortiguador para estabilizar los valores de S(x). Por ello, con valores pequeños de k, mayores a 1 pero menores a 5, S(x) dibuja un pico antes de estabilizarse; en cambio a partir de k = 5, S(x) tiene un comportamiento muy bien acotado para dibujar un trapezoide. El comportamiento S(x) en función de k puede observarse en la gráfica de la Figura 3.11. El valor de k indica el porcentaje de crecimiento de la función, por ello se le conoce como la constante de escalamiento.

Tabla 3.5. S(x) en función del valor de k

X	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5	k = 6	k = 10
-4	-0.000335575	-6.14425E-06	-1.1254E-07	-2.0612E-09	-3.7751E-11	-4.2484E-18
-3	-0.002484912	-0.000123425	-6.1443E-06	-3.059E-07	-1.523E-08	-9.3576E-14
-2	-0.01865736	-0.002484912	-0.00033558	-4.5402E-05	-6.1443E-06	-2.0612E-09
-1	-0.156517643	-0.052395696	-0.01865736	-0.00678365	-0.00248491	-4.5402E-05
1	1.156517643	1.052395696	1.01865736	1.00678365	1.00248491	1.0000454
2	1.01865736	1.002484912	1.00033558	1.0000454	1.00000614	1
3	1.002484912	1.000123425	1.00000614	1.00000031	1.00000002	1
4	1.000335575	1.000006144	1.00000011	1	1	1

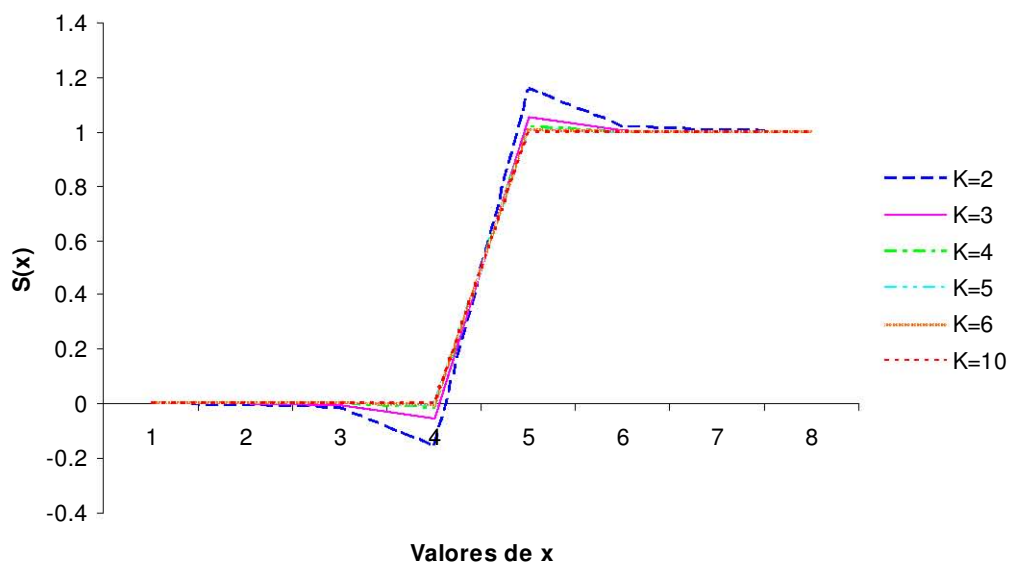


Fig. 3.11. Gráfica de $S(x)$ con diferentes valores de k

La selección de una técnica particular depende de dos cosas: de la naturaleza de la aplicación y de la elección del usuario en este caso se seleccionaron los MCDs para representar la conducta. La conducta a modelar se centra en el proceso de toma de decisiones, cuyo razonamiento implica alcanzar un objetivo predefinido, a partir de uno o más estados iniciales, por lo que entre menor sea el número de transiciones para alcanzar el objetivo final, el sistema de razonamiento será más eficiente. Así, incrementar la eficiencia implica minimizar los estados intermedios, lo cual queda representado en la organización de la base de conocimiento. Lo anterior se traduce en una implementación del motor de inferencia eficiente y rápida, en otras palabras se cierra de forma más rápida el circuito entre la percepción y la acción [14]. Los mapas cognoscitivos nos permiten la representación de muchas reglas de forma eficiente a través de los enlaces.

En una planta nuclear cuyo objetivo es generar energía eléctrica, un punto importante son las situaciones críticas debido a fallas en los sistemas de control. En este caso se deben mitigar los efectos de las fallas mecánicas y/o eléctricas de las diferentes variables que mantienen al reactor en funcionamiento y en su caso restaurar este equilibrio a través de una toma de decisiones preventiva [32, 33, 42]. Este trabajo utiliza los MCDs para modelar la conducta de un experto en la toma de decisiones [13].

Para ello, como primer paso debemos detectar a través de un análisis conductual los elementos que generan esa conducta y el proceso de esa conducta. Los elementos estarán representados por los nodos y la conducta a través de los enlaces entre estos nodos [17, 25].

El desarrollo paso a paso de la metodología que se siguió en el caso de estudio se ve con mayor detalle en el *capítulo 5*, mientras que en el *capítulo 4* se detalla el dominio, particularmente el escenario elegido (LOCA pequeño) al acotar el problema.

Capítulo 4

FALLAS DE RIESGO Y GUIA DE PROCEDIMIENTOS EN EMERGENCIA EN UNA PLANTA NUCLEOELÉCTRICA

El presente capítulo comprende los antecedentes en el dominio de aplicación (Planta Nucleoeléctrica) que nos permiten contextualizar nuestra propuesta como solución frente a los problemas de linealidad que su método de análisis de riesgo comprende actualmente.

Estos problemas de linealidad consumen tiempo valioso en situaciones de riesgo e incluso recursos económicos al estar realizando más acciones correctivas que pudieran evitarse mediante las acciones preventivas sugeridas por el sistema experto predictivo.

Para tener un panorama general del dominio de aplicación, y en particular del escenario al que nos avocamos en el caso de estudio, se abordan los siguientes temas: escenario LOCA pequeño, procedimientos en emergencia, sistemas de mitigación participantes en el escenario LOCA pequeño y los sistemas auxiliares de enfriamiento HPCS y LPCS

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las metodologías tendientes a proveer mayor seguridad en los procesos de riesgo, se han diversificado y las existentes se han fortalecido. Una de ellas, incluso la más utilizada, ha sido el análisis probabilista de riesgos. Por ello la comisión nacional de seguridad nuclear y salvaguardias (CNSNS) inició proyectos de análisis de eventos internos con la finalidad de establecer las condiciones iniciales para un análisis de la respuesta de la contención a accidentes severos. El análisis de eventos internos pretende identificar las fallas potenciales de sistemas, las secuencias de accidentes severos posibles y con ello obtener una mayor comprensión cuantitativa de la frecuencia total de daño al núcleo y de la incertidumbre asociada [12].

Los estudios que la propia CNSNS inició con la metodología lineal ya vista en el *capítulo 1* (*sección 1.5*), y la incertidumbre asociada, plantea para la inteligencia artificial un dominio atractivo para la aplicación de sus técnicas de representación, en especial para la técnica de los mapas cognoscitivos difusos, vista ampliamente en el *capítulo 3*. Ahora veremos en qué consiste el escenario que elegimos como dominio de aplicación y los elementos que son considerados en los procesos de mitigación.

4.1 ACCIDENTE POR PÉRDIDA DE REFRIGERANTE: LOCA PEQUEÑO

LOCA pequeño llamado así por sus siglas en inglés (*Loss Of Coolant Accident*) es el escenario bajo el cual existe una ruptura lo suficientemente pequeña tal que los sistemas de baja capacidad son suficientes para compensar la pérdida de refrigerante. El tamaño de esta categoría de LOCA puede ser aproximado a una válvula de alivio/seguridad atascada abierta. Se consideran dentro de esta categoría a la pérdida de líquido equivalente a una ruptura menor a 0.004 pie^2 y a la pérdida de vapor equivalente a una ruptura menor a 0.005 pie^2 [12].

LOCA pequeño está constituido por una serie de estados a partir de un evento inicial de pérdida de refrigerante y el conjunto de acciones que buscan revertir o mitigar los efectos del estado de emergencia producido por tal evento. De manera que con estas acciones mitigantes se busca restaurar el equilibrio entre los diferentes parámetros que mantienen al reactor dentro del funcionamiento normal en conjunción con la vasija de contención estabilizada [12, 32, 33].

El alcance del caso de estudio comprende las trayectorias originadas por el efecto de los parámetros a controlar en el escenario de emergencia LOCA pequeño. En la Figura 4.1 a) y 4.1 b) se representan de forma general las trayectorias posibles [12].

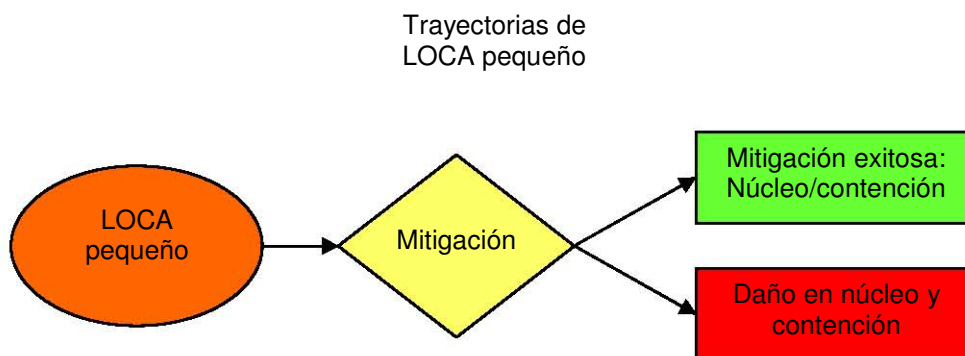


Fig. 4.1. a) Representación del alcance de la propuesta de análisis

Si (evento LOCA-Pequeño) **Entonces**

éxito = Falso

Trayectorias (éxito)

FinSi

éxito es una variable lógica cuyo valor se devuelve después de ejecutarse los procesos de mitigación llamado 'Trayectorias' y traerá un valor de Verdadero en caso de éxito y Falso en caso contrario.

Si (éxito) **Entonces**

Núcleo y Contención en buen estado

SiNo

Núcleo Dañado y Vasija de Contención Vulnerable

FinSi

Fig. 4.1 b) Modelo mental generalizado del escenario LOCA pequeño

Los procedimientos en emergencia son aplicados antes y durante una emergencia como LOCA pequeño, detectada a través del cambio en los parámetros físicos de operación de la planta. El objetivo de tales procedimientos es restaurar el equilibrio normal de operación de la planta. Estos procedimientos son descritos a continuación.

4.2 PROCEDIMIENTOS EN EMERGENCIA

En una planta nuclear del tipo BWR por sus siglas en inglés (*Boiling Water Reactor*), similares al de la central de Laguna Verde, los siguientes elementos son considerados como barreras de contención contra la descarga de radioactividad:

1. Defensa en profundidad
 - Pastilla de combustible poroso
 - Encamisado del combustible
 - Reactor
 - Contención primaria
2. La contención secundaria (edificio del reactor)
3. La frontera del sitio (la central resguardada)

Para cubrir individualmente estas barreras de contención se han desarrollado guías genéricas para la respuesta a emergencias.

Estas guías son sintomáticas en el sentido del **estado de los parámetros principales de la central (temperaturas, presiones, nivel, entre otros)**, más que en la ocurrencia de eventos individuales. Dichos parámetros **dictan los requisitos de entrada y ejecución de los procedimientos de emergencia** [10].

Las guías de procedimiento se clasifican en las siguientes:

- a) Guía de control del reactor
- b) Guía de control de la contención primaria
- c) Guía de control de la contención secundaria
- d) Guía de control de liberación radiactiva
- e) Guía de inundación de la vasija
- f) Guía del control de nivel/potencia

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas guías.

- a) En la guía de control del reactor se mantiene un adecuado enfriamiento del núcleo, se detiene el reactor y se lleva a condiciones de parada fría. La entrada a esta guía es con cualquier condición de bajo nivel en el reactor o alta presión en el reactor o alta presión en el pozo seco, o bien si ocurre una condición que requiera un

movimiento automático de las barras de control SCRAM por sus siglas en inglés (*Safety Control Rod Automatic Movement*, originalmente correspondía a las siglas *Safety Control Rod Axe Man*, el "axe man" se refiere al trabajador designado para insertar la barra de emergencia en el primer reactor *The Chicago Pile* en E.U.) del reactor y la potencia en el mismo sea superior a la de disparo de los monitores del intervalo de potencia promedio APRM por sus siglas en inglés (*Average Power Range Monitor*) por baja escala o no se pudiera determinar.

- b) En la guía de control de la contención primaria, se mantiene la integridad de la misma y se protege al equipo que está dentro de ella. La entrada a esta guía se presenta cuando alguna de las condiciones de temperatura: 1) en el pozo seco, ó 2) en la alberca de supresión, ó 3) que la presión en el pozo seco sea superior al límite máximo de operación, ó 4) que el nivel de agua en la alberca de supresión esté fuera de sus límites operativos superior o inferior.
- c) En la guía de control de la contención secundaria, se protege la contención secundaria, se limita la liberación radiactiva hacia la contención secundaria y tanto mantiene su integridad como limita la liberación radiactiva al exterior. La entrada a esta guía es cuando alguna de las condiciones de temperatura de la contención, nivel de radiación o nivel de agua excede su límite máximo de operación o cuando el valor de presión diferencial de la contención secundaria se hace cero.
- d) En la guía de control de liberación radiactiva, se limita la liberación de radiactividad hacia afuera de las contenciones primaria y secundaria. La entrada a esta guía se presenta cuando el ritmo de liberación de radiactividad excede el del nivel de alerta.
- e) La guía de inundación de la vasija establece la inyección de agua en la vasija y el incremento de nivel hasta que se inunden las líneas de vapor o, si el reactor no se ha apagado, el núcleo será adecuadamente enfriado mediante una combinación de inmersión y enfriamiento por vapor. Las instrucciones de esta guía pueden ser requeridas para asegurar el adecuado enfriamiento del núcleo si las condiciones de la planta son tales que el nivel del agua en la vasija no pueda ser determinado.
- f) El propósito de la guía del control de nivel/potencia, es el de mantener un adecuado enfriamiento del núcleo y el de reducir la potencia del reactor mediante el control del nivel del reactor bajo condiciones donde las barras de control no son insertadas hasta o más allá de la posición 02 (máxima posición de extracción subcrítica).

En diversos puntos de estas guías, se especifican límites de los parámetros esenciales de la central para ejecutar acciones de control. Estos límites son conservadores en el sentido de minimizar los daños a equipos y sistemas, los cuales se obtienen de análisis de ingeniería previos utilizando modelos de la "mejor-estimación", garantizando un rango de operación segura para la planta. No obstante, estos límites desde el punto de vista de las especificaciones técnicas (i.e. especificaciones de temperatura, presión bajo los cuales se debe operar de acuerdo al fabricante de dichos equipos o sistemas) no son tan conservadores, es decir que seguir las guías de procedimientos en emergencia no asegura la conformidad con las Especificaciones Técnicas u otros compromisos de licenciamiento. La operación fuera de estas especificaciones durante condiciones de respuestas a emergencias (i.e., después de requerir la entrada a procedimientos de emergencia) está autorizada específicamente por el código legal estadounidense 10 CFR 50.54(x), relacionada con los niveles radiológicos permitidos, en diferentes áreas [10].

El uso de los códigos numéricos para análisis de los reactores nucleares del tipo "mejor estimación" da flexibilidad óptima para las acciones del operador preservando aún la operación segura de la planta.

Las condiciones de entrada a un procedimiento de emergencia se especifican de manera que garanticen, hasta donde sea posible, la acción oportuna para evitar que la situación se degrade en una emergencia.

Nuestra propuesta es: considerando los procedimientos de emergencia existentes, contar con la ayuda de un sistema experto que le proporcione al operador información sobre el estado futuro de los parámetros esenciales de la central, a partir del cambio de uno o más de ellos y de esta manera pueda anticiparse en su acción frente a un posible escenario de emergencia como LOCA pequeño.

En este trabajo se considera el estudio y análisis de los parámetros esenciales relacionados con la defensa en profundidad, específicamente **el reactor nuclear y la contención primaria**.

Conocer estos procedimientos nos garantiza una respuesta oportuna para evitar en lo posible una emergencia, por ello en el caso de estudio, se lleva a cabo un análisis de los parámetros físicos que son considerados por estas guías de procedimientos (sección 5.3.1. inciso a).

Sin embargo, aún teniendo un análisis de parámetros que ayuda en la prevención de una emergencia, mediante la aplicación de las guías correspondientes, la posibilidad de que la emergencia ocurra sigue existiendo. Por ello, es necesario conocer también los sistemas auxiliares de enfriamiento que entran en operación para mitigar los efectos de una emergencia como LOCA pequeño (sección 5.3.1 inciso b) y son estos sistemas los que se describen en el siguiente punto.

4.3 SISTEMAS AUXILIARES HPCS Y LPCS

Debido a que el reactor es básicamente un calentador de agua, se requieren de procesos que limpien y controlen la química del agua en la vasija del reactor así como de que protejan al núcleo del reactor. Los sistemas auxiliares son precisamente, los destinados a realizar esta función, tanto en condiciones normales como en los anormales. En el caso de estudio nos interesan los utilizados en condiciones anormales pues son los utilizados en una emergencia como LOCA pequeño. Estos sistemas son: el sistema de enfriamiento a alta presión, conocido como HPCS por sus siglas en inglés (*High Pressure Core Spray System*) y el sistema de enfriamiento a baja presión, conocido como LPCS por sus siglas en inglés (*Low Pressure Core Spray System*) [9, 43].

4.3.1 Sistema de enfriamiento del núcleo a alta presión HPCS

El propósito del sistema HPCS es despresurizar el sistema de calentamiento del núcleo y proveer agua ante un evento de pérdida de refrigerante del reactor, como el que ocurre en el escenario LOCA pequeño. El HPCS proporciona el agua como un rocío sobre el montaje del combustible desde unas llaves dentro de la vasija del reactor. Forman parte del sistema válvulas, una bomba, tuberías e instrumentación necesaria para hacer pruebas durante la operación de la planta.

El agua refrigerante utilizada, es abastecida desde el tanque de almacenamiento de agua condensada. Una vez agotada el agua de este suministro, automáticamente transfiere agua de la alberca de supresión. La bomba de succión, se utiliza para succionar agua tanto del tanque como de la alberca de supresión. La pérdida de agua del sistema de calentamiento nuclear, es drenada al pozo seco al nivel de la barrera y en seguida a la alberca de supresión, proporcionando así, una fuente inagotable de agua refrigerante. De esta manera permite que la operación del sistema HPCS continúe hasta que sea parado manualmente desde la sala de control. El sistema de tuberías, por su parte, se mantiene lleno de agua condensada en todo momento para evitar retardos en el llenado de las líneas de flujo. Mediante las líneas de retorno el agua regresa a su origen una vez realizada su función primordial: el enfriamiento del núcleo.

El sistema HPCS es iniciado automáticamente debido a la alta presión en la contención primaria o por el bajo nivel de agua en la vasija del reactor. Una válvula en la línea de descarga previene un reflujó desde la vasija del reactor cuando la presión en la vasija es mayor que la presión del sistema HPCS. En la Figura 4.2 se muestra el diagrama del sistema HPCS.

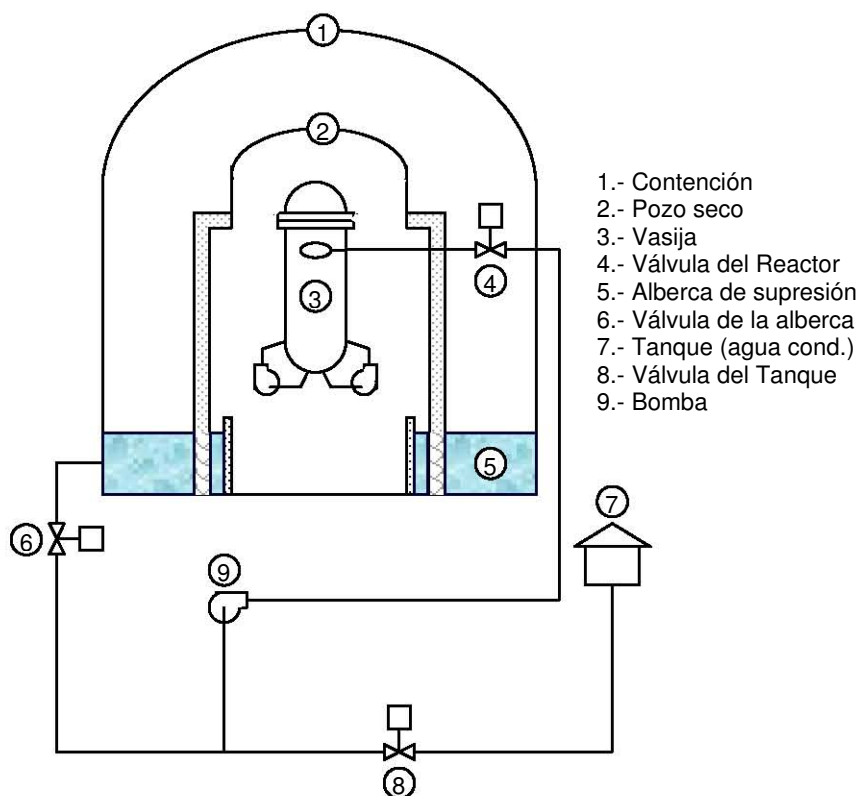


Fig. 4.2. Diagrama del Sistema HPCS

4.3.2 Sistema de enfriamiento del núcleo a baja presión LPCS (V2)

La función del sistema LPCS es prevenir el daño del revestimiento del combustible (fragmentación), en caso de que el núcleo sea descubierto por la pérdida de refrigerante. El sistema LPCS incluye llaves para rociar, las cuales están situadas dentro de la vasija del reactor; incluye también, una bomba de succión, válvulas, tuberías y la instrumentación necesaria para la realización de pruebas.

El sistema es conectado a la alberca de supresión para el suministro de agua refrigerante.

Las llaves de suministro del agua refrigerante pueden ser operadas automáticamente o manualmente. La operación de la bomba del sistema LPCS se debe a un muy bajo nivel del agua del reactor y/o a un aumento de la presión en el pozo seco.

La pérdida de agua de la vasija del reactor se recolecta en el pozo seco hasta el nivel de la barrera y después pasa a la alberca de supresión. Esto permite que el ciclo se cierre, de manera que el sistema continúa operando hasta que es parada manualmente. Prácticamente, el sistema LPCS está conformado de la misma manera que HPCS, la única diferencia es que LPCS opera en un rango de presión por debajo de las altas presiones a las que el sistema HPCS puede seguir operando. En la Figura 4.3 se muestra el diagrama del sistema LPCS.

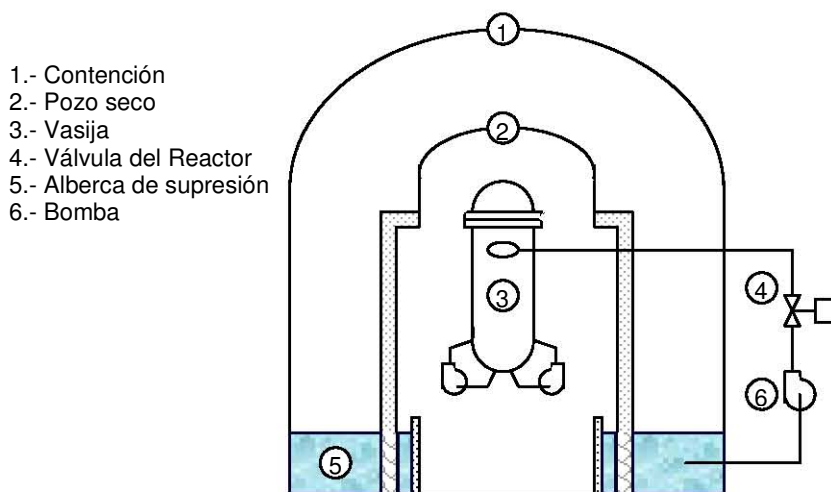


Fig. 4.3. Diagrama del Sistema LPCS

4.4 SISTEMAS QUE INTERVIENEN EN EL ESCENARIO LOCA PEQUEÑO

Los mecanismos de mitigación tienen como objetivo primordial que aún cuando se haya entrado en un escenario de emergencia como LOCA pequeño, se activen sistemas auxiliares de respaldo como HPCS y LPCS, conjuntamente con sistemas de despresurización. Los sistemas mitigantes ya vistos en la *sección 4.3* son tolerantes a fallos, es decir, cuentan a su vez con sistemas de respaldo que realizan la misma función cuando los primeros fallan o son insuficientes para enfrentar una emergencia como LOCA pequeño. El sistema RCIC, por ejemplo, denominado así por sus siglas en inglés (*Reactor Core Isolation Cooling System*), funciona como respaldo de HPCS, ambos pueden operar a alta presión. Una vez que los sistemas a alta presión logran su cometido (despresurizar), entran en acción más sistemas y mecanismos de enfriamiento. Estos mecanismos solo operan a “baja presión” y son los siguientes: el condensador, el sistema LPCS (*sección 4.3*), la función de inyección de refrigerante a baja presión LPCI (V3) denominado así por sus siglas en inglés (*Low Pressure Coolant Injection*) y el sistema NWS (V4) enlazado con LPCI. La despresurización es importante porque permite continuar con la acción de enfriamiento y enfrentar la pérdida de refrigerante debido a la emergencia LOCA pequeño. Si los sistemas que operan a alta presión (HPCS y RCIC) no logran despresurizar lo suficiente o simplemente fallaran, entonces entraría en acción un sistema despresurizador. Otro sistema que también interviene es el Transformador de calor residual RHR denominado así por sus siglas en inglés (*Residual Heat Removal*). Este sistema puede trabajar conjuntamente con el subsistema LPCI. En casos extremos, para enfrentar la emergencia, se hace uso del venteo como mecanismo de enfriamiento; incluso se llega a utilizar el mecanismo de fuga con el mismo objetivo: compensar la pérdida de refrigerante de manera que la temperatura, la presión y el nivel de agua vuelvan a su rango normal de operación. Estos sistemas y los mecanismos mencionados se describen a continuación [9, 43].

4.4.1 Sistema aislado de enfriamiento del núcleo del reactor RCIC

El RCIC mantiene suficiente agua en la vasija del reactor para enfriar el núcleo y mantener así el calentamiento nuclear suspendido, en caso de que la vasija quede aislada del condensador de vapor y del suministro de agua. El sistema también permite el apagado total de la planta bajo condiciones de pérdida del sistema de suministro de

agua. Y en tal caso, mantiene el agua necesaria para el reactor hasta que la vasija es despresurizada, permitiendo operar la función de enfriamiento en apagado del sistema de eliminación de calor residual RHR. El sistema distribuye el flujo entre las tuberías y la bomba para asegurar una rápida respuesta y eliminar un potencial problema hidráulico.

4.4.2 Condensador (V1)

El condensador es un gran mecanismo de transferencia de calor de un fluido a otro, un claro ejemplo es el radiador de los automóviles donde el líquido anticongelante transfiere calor al aire circulante a través del radiador.

El condensador está diseñado para enfriar el vapor expulsado de una turbina a una temperatura por debajo del punto de ebullición de manera que pueda regresar a la fuente de calor como agua, es decir, el condensador, como su nombre lo indica condensa el vapor (transforma el vapor en agua).

En un reactor presurizado, el agua regresa al generador de vapor; en cambio, en un reactor del tipo BWR, como lo es el de la planta nucleoeléctrica de Laguna Verde, el agua regresa al núcleo del reactor.

El vapor transformado por el condensador en líquido es transferido a un sistema de agua circulante y es expulsado al ambiente, ya sea por una torre de enfriamiento o directamente a un contenedor de agua.

4.4.3 Válvula de alivio (P) y Válvula manual para tener disponibilidad del condensador (01):

Ambas válvulas permiten el paso de agua circulante para mantener en equilibrio la operación normal de la planta. Este equilibrio se refiere a mantener el núcleo en un rango de temperatura que no represente ningún daño o riesgo de accidente.

4.4.4 Despresurizador (X1)

El despresurizador es un sistema de despresurización que consiste en la apertura con lógica redundante de las válvulas de alivio/seguridad (P) seleccionadas, cuando son requeridas. La lógica redundante se refiere a que dada la falla de una de las válvulas, en su lugar puede abrir otra. La finalidad de este sistema es proveer la despresurización ante eventos como LOCA pequeño si el sistema de inyección de refrigerante a alta presión no está disponible o no puede restablecerse el nivel de agua en la vasija del reactor. La apertura de las P también puede hacerse en forma manual, de manera que tres o más sean abiertas permitiendo así la inyección. Este sistema es capaz de operar a alta presión.

4.4.5 Sistema eliminador de calor residual RHR (W)

Este sistema remueve el calor residual generado por el núcleo bajo condiciones normales y en condiciones de apagado anormal.

La función LPCI de este sistema es una parte integral del sistema refrigerante cuyos objetivos son:

- Restaurar y mantener, si es necesario, el nivel del agua en la vasija del reactor después de un accidente por pérdida de refrigerante como LOCA pequeño. De manera que el núcleo es suficientemente enfriado para prevenir el daño del revestimiento del combustible (fragmentación).
- Limitar la temperatura de la alberca de supresión

- Remover el calor degradado y el sensible del sistema de calentamiento nuclear mientras el reactor es apagado para el reabastecimiento del combustible y servicio de mantenimiento
- Condensar el vapor del reactor de manera que el calor residual y degradado sea removido si el condensador principal no está disponible (parada en caliente).
- Proporcionar capacidad de refrigerante adicional cuando sea necesario

El sistema RHR consta de subsistemas con las siguientes funciones de operación para satisfacer los objetivos arriba mencionados:

LPCI: Esta función, conjuntamente con el sistema LPCS, el HPCS y/o la automática despresurización del sistema de calentamiento del núcleo; restaura y mantiene el nivel de agua deseado en la vasija del reactor. Lo cual se requiere para el enfriamiento para mitigar los efectos de LOCA.

SPC: La función de la alberca de supresión SPC denominada así por sus siglas en inglés (*Supresión Pool Water*) asegura que la temperatura en la alberca de supresión no exceda el límite predeterminado que generalmente es de 170 °F (77 °C). El agua de la alberca es bombeada, a través de cualquiera de los dos circuitos completamente independientes que existen, y regresada a la alberca.

SDC: La función de refrigerante en el apagado SDC denominada así por sus siglas en inglés (*ShutDown Cooling*), remueve el calor residual (degradado y sensible) del sistema de calentamiento nuclear, después de apagar el reactor (para reabastecimiento de combustible o mantenimiento del sistema nuclear. Cuando la presión de la vasija del reactor es reducida a 135 psi (931 kPa) después del apagado, se inicializa manualmente esta función para drenar, primero las tuberías de agua circulante en los dos circuitos independientes. Para ello, bombea el agua a través del condensador y la regresa a la vasija del reactor, utilizando las líneas de realimentación de agua. Esta función tiene la capacidad de reducir la temperatura de la vasija del reactor a 125 °F (52 °C) aproximadamente en 20 hrs. Durante la operación de esta función, una parte del fluido es desviado hacia las llaves rociadoras de la vasija del reactor, para condensar el vapor concentrado en ella.

CSC: La función de enfriamiento de la contención CSC denominado así por sus siglas en inglés (*Containment Spray Cooling*), condensa y remueve el calor de cualquier vapor que atravesase el pozo seco y previene el exceso en la presurización de la contención. Esta función es iniciada y terminada manualmente.

4.4.6 Venteo (Y) y Fuga (R)

El proceso de venteo consiste en evacuar el calor de la contención, por medio de la conducción de gases (hidrógeno y vapor de agua, entre otros), hacia la atmósfera exterior. Para ello utiliza un sistema de ventilación del que forman parte las enormes chimeneas de la planta. El objetivo es evitar la concentración de hidrógeno en la contención con riesgo de explosión por la sobrepresión. Dependiendo de la secuencia accidental, ante la acumulación de vapor y gases combustibles en un recinto y el lógico incremento de presión en el mismo, se producirá la apertura de los paneles fusibles de sobrecarga (ubicados en las paredes divisorias entre recintos) favoreciendo el mezclado de la atmósfera.

En un estudio realizado en Argentina sobre contenciones nucleares [1], mencionan las consecuencias catastróficas de altas concentraciones de hidrógeno y refieren las técnicas de inertización de la contención para evitar o en su caso tratar un accidente severo por causa de esta problemática:

La técnica de inertización pre-accidente consiste en reemplazar el aire de la contención con un gas inerte (N₂ o CO₂) durante la operación normal.

Cuando ocurre un accidente, se aplica la técnica de inertización post-accidente, la cual consiste en reemplazar el aire de la contención con un gas inerte (N₂ o CO₂), inmediatamente después del comienzo del accidente, mientras la radiactividad es aún despreciable dentro de la contención.

Desde principios de la década de 1980, se han realizado investigaciones sobre la inertización de la atmósfera de la contención post-accidente, en casos de accidentes severos. Actualmente, en las centrales BWR tipo Mark I y Mark II se han utilizado sistemas de inertización pre-accidental, con nitrógeno.

Cuando el proceso de venteo falla o no es suficiente, entonces se recurre a una medida extrema, realizar la fuga controlada de gases siguiendo las guías de procedimientos en emergencia [10].

*“Probamos por medio de la lógica,
pero descubrimos por medio de la intuición”
Henri Poincaré (1854-1912); matemático francés*

Capítulo 5

REPRESENTACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES EXPERTA FRENTE AL ESCENARIO LOCA PEQUEÑO

La toma de decisiones en una Planta nucleoelectrica es un proceso complejo debido a los numerosos elementos involucrados en el funcionamiento de la misma y la atención permanente que demanda su mantenimiento. Actualmente, el proceso de toma de decisiones en la Planta es analizado y desarrollado por un humano, utilizando diagramas cuya principal característica es la representación lineal de los eventos dentro de un escenario (*capítulo 1, sección 1.5*). Este proceso es lento y puede llegar a la generación de nuevos fallos. La propuesta es el desarrollo de un sistema experto que ayude en la toma de decisiones; siendo el principal objetivo el diseño de la representación del conocimiento y el diseño del razonamiento a través de este último. El dominio se encuentra ubicado en los eventos de falla en una planta nuclear. Para automatizar el proceso de la toma de decisiones se desarrolla una representación del conocimiento utilizando los mapas cognoscitivos difusos (MCD). Lo que nos permite modelar la conducta del experto, en la toma de decisiones con incertidumbre. Para ello se describe la metodología utilizada para el desarrollo del sistema experto

INTRODUCCIÓN

La emulación del comportamiento del experto necesita, además de una técnica de representación (*capítulos 2 y 3*), de la cuidadosa determinación del conocimiento del experto, la experiencia de éste, incluyendo la incertidumbre involucrada en el proceso. Las técnicas usuales de elicitación del conocimiento no son muy adecuadas porque ignoran ciertos componentes cognoscitivos, como los modelos mentales, que son elementos esenciales del comportamiento experto [2, 3, 5, 18].

El análisis cognoscitivo de tareas (ACT) permite obtener los componentes cognoscitivos de una tarea:

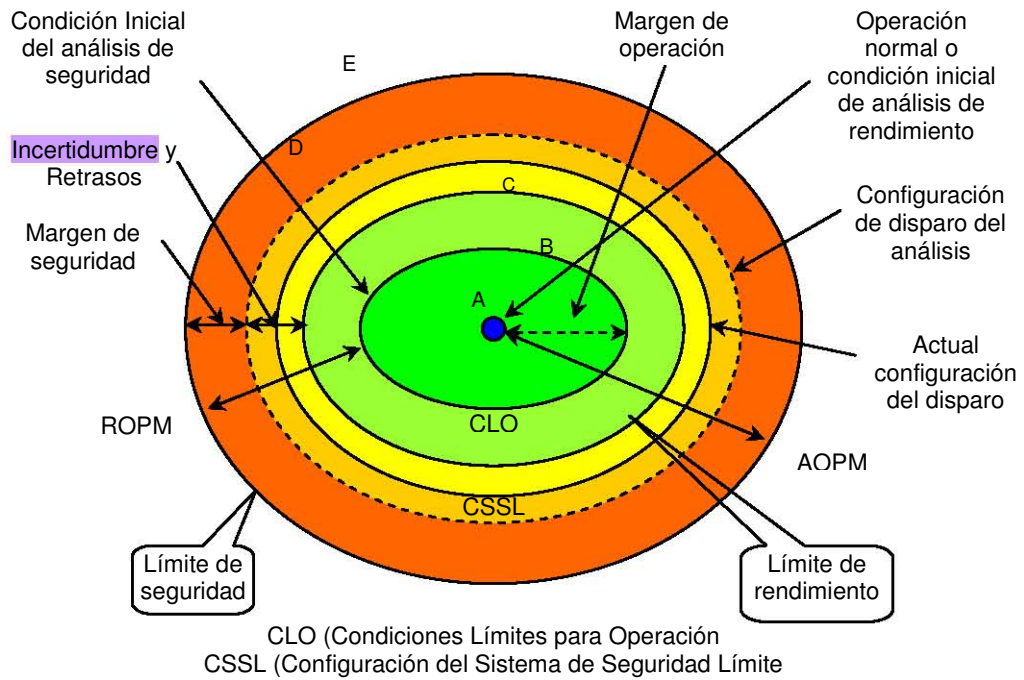
- conocimiento declarativo
- técnicas y procedimientos
- estrategias y modelos mentales

De acuerdo a Ryder y Redding [18 y 21], es recomendable un ACT en tareas que:

1. Involucran un alto grado de complejidad del problema y toma de decisiones.
2. Requieren una carga de trabajo fuerte o mucha atención por parte del individuo.
3. Subyace el desarrollo de habilidades, por ejemplo, que requieren mucha práctica para lograr la pericia.
4. Requieren grandes cantidades de información para ser asimilada durante la instrucción.
5. Los expertos consideran difíciles de verbalizar o demostrar a través de otras acciones, para inferir el proceso cognoscitivo.
6. Conllevan una considerable cantidad de dudas individuales de acuerdo al número de estrategias cognoscitivas disponibles.

La tarea primordial de nuestro caso de estudio es la toma de decisiones experta ante un escenario de emergencia como LOCA pequeño. Este tipo de tarea cumple con la mayoría de las condiciones bajo las cuales se recomienda el uso del ACT:

1. La tarea del caso de estudio involucra complejidad en el problema y toma de decisiones.
2. El supervisor que opera la planta requiere de mucha atención para monitorear los procesos y los parámetros involucrados como temperatura, presión, nivel de agua, etc.
3. Los supervisores reciben grandes cantidades de información (guías de procedimientos, manuales, códigos) necesarias para su instrucción.
4. Los expertos consideran que ciertos aspectos son difíciles de verbalizar o de demostrar.
5. La tarea conlleva dudas por la incertidumbre asociada al proceso de la toma de decisiones frente a un escenario de riesgo como LOCA pequeño. Esta incertidumbre se muestra en el análisis de seguridad representado por la Figura 5.1.



A y B Límites permitidos
 C Región donde el canal puede determinarse inoperable
 D Margen de operación de la planta
 E Región de Tolerancia de calibración
 ROPM y AOPM márgenes

Fig. 5.1 Diagrama conceptual de análisis de seguridad y rendimiento del SMART [15]

En la sección 5.3.1 se detalla este análisis paso a paso, como parte de la metodología que se desarrolló.

5.1. JUSTIFICACIÓN

Los procesos de toma de decisiones en las tareas de supervisión en una planta nuclear, plantean dificultades para el ser humano que las realiza, porque tales tareas implican acciones repetitivas, además de complejas, como la vigilancia y control de una gran cantidad de aspectos de la operación. Lo cual demanda su atención de manera permanente. Esta característica de permanencia, inherente a la operación, va mermando la eficiencia del que está encargado de ejecutar la supervisión. Ello se observa en los accidentes ocurridos después de un prolongado trabajo sin periodos de descanso. El problema se acentúa cuando la operación se realiza bajo condiciones de tensión nerviosa, debido a situaciones de riesgo como lo son las emergencias y la posibilidad de éstas generen accidentes graves.

Ante esta problemática, la inteligencia artificial (IA) encuentra la oportunidad de resolverla mediante la automatización del proceso de toma de decisiones de un experto humano. Esto se logra desarrollando un sistema experto que logre emular la conducta cognoscitiva del experto ante tales situaciones de riesgo sin menoscabo de su eficiencia durante el tiempo que dure la situación, no importando si este tiempo es corto o prolongado. Los sistemas expertos en toma de decisiones, funcionan como herramientas de ayuda o entrenamiento del supervisor humano, pues de ninguna manera pretenden ni podrían (en la actualidad) sustituir en este tipo de tareas al experto humano.

Actualmente cuentan con herramientas que les permiten analizar y en base en ello, tomar decisiones (capacitación, entrenamiento y pruebas de rutina). La metodología utilizada para analizar y tomar decisiones es binomial, dando origen a innumerables árboles para representar la supervisión que se debe seguir en los diferentes sistemas de control el ejemplo se puede observar en las Figuras 1.2 y 1.3 (*sección 1.5*).

Nuestra propuesta es aportar un modelo de representación que se identifica con la forma de razonar del experto, a través de modelos mentales. Tratando el problema como un todo, en lugar de particularizar a tal grado las situaciones, que los árboles crecen exponencialmente haciendo difícil su seguimiento. Sin embargo tanto una como otra técnica proporcionan resultados aproximados satisfactorios.

Los mapas cognoscitivos difusos (MCDs) nos permiten simular la conducta experta a través de relaciones de causa-efecto, facilitando la labor de representación. Otra de las razones para usar esta técnica es que tratándose de eventos concurrentes, es recomendable el uso de técnicas con procesamiento paralelo distribuido como sucede con los MCDs.

5.2. OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo es crear un sistema experto que asista en la toma de decisiones del supervisor de una planta nucleoelectrica, frente a escenarios de riesgo/emergencia como el accidente por falta de refrigerante LOCA pequeño.

Objetivos particulares

- Realizar el análisis de la conducta del experto, en la toma de decisiones, para elicitación del conocimiento experto.
- Modelar la representación de la conducta cognoscitiva de un experto, específicamente la toma de decisiones, utilizando la técnica de representación mapas cognoscitivos difusos.
- Implementar el modelo cognoscitivo para simular la conducta experta frente a escenarios de riesgo.
- Desarrollar una base del conocimiento (matriz de relaciones de causalidad) que contenga el conocimiento aproximado procurando la mayor fidelidad al conocimiento experto.
- Diseñar un mecanismo de inferencia capaz de controlar la base del conocimiento, de manera que logre simular el comportamiento cognoscitivo del experto en la toma de decisiones, frente a un escenario de emergencia como LOCA pequeño.
- Diseñar la interfaz del sistema experto

5.3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos se llevó a cabo la siguiente metodología:

- a) Identificación del dominio y alcance
- b) Comprensión del problema
- c) Representación (Construcción del Modelo usando los MCDs vistos en el *capítulo 3*)
 - Análisis cognoscitivo de tareas

- Identificación de los nodos del mapa
 - Establecimiento de relaciones entre los nodos
 - Mapa y matriz de relaciones
- d) Elección de la función umbral
- e) Programa de evaluación
- f) Pruebas e Interpretación de Resultados

5.4 IDENTIFICACIÓN DEL DOMINIO Y ALCANCE

En este caso, el dominio sobre el cual se trabajó es precisamente las dos primeras líneas de defensa que son necesarias cubrir en una emergencia, es decir, el reactor y la contención primaria.

Una vez identificado el dominio, debido al extenso número de escenarios a los que nos puede llevar es necesario acotar el alcance del análisis, es decir, elegimos un escenario específico a representar mediante la técnica de representación elegida (MCD). El escenario elegido es el denominado Accidente por Pérdida de Refrigerante LOCA por sus siglas en inglés (*Loss Of Coolant Accident*) visto en la *sección 4.1*, por ser uno de los escenarios más representativos de accidentes. Los accidentes LOCA se clasifican de acuerdo a la cantidad de refrigerante que se pierde: así tenemos el denominado LOCA pequeño, LOCA mediano y LOCA grande [9, 12, 26, 43]; el presente trabajo se abocará al primero, ya que no por tratarse de una pérdida “pequeña” su efecto es menor, pues puede incluso llegar a provocar consecuencias mayores que uno grande.

5.5 COMPRENSIÓN DEL PROBLEMA

Para comprender el problema se necesitan los siguientes elementos: Coherencia, correspondencia y relación (*sección 2.2*) y consiste de dos pasos básicos:

1. Identificar la información pertinente a partir de la descripción de un problema, eliminar la información innecesaria: Se obtuvo una primera aproximación muy generalizada, e incompleta, pero sirvió de pauta para continuar. El modelo se muestra en la Figura 5.2.

Si (evento LOCA-Pequeño) **Entonces**

éxito = Falso

Trayectorias (éxito)

FinSi

éxito es una variable lógica cuyo valor se devuelve después de ejecutarse los procesos de mitigación llamado ‘Trayectorias’ y traerá un valor de Verdadero en caso de éxito y Falso en caso contrario.

Si (éxito) **Entonces**

Núcleo y Contención en buen estado

SiNo

Reactor Dañado y Vasija de Contención Vulnerable

FinSi

Fig. 5.2. Trayectorias del escenario LOCA pequeño

2. Organizar un esquema de forma correcta: Este paso se desarrolló siguiendo la metodología para la construcción del modelo usando la técnica de los mapas cognoscitivos difusos en colaboración con el análisis cognoscitivo de tareas para lograr modelar la conducta cognoscitiva del experto (*sección 5.3*).

Una vez más, se reafirma lo siguiente:

Identificar la mejor representación de un problema es un arte y solo se puede aprender de forma intuitiva. No existen reglas rígidas y rápidas que puedan enmarcar de forma rápida y sencilla la identificación de la representación del espacio del problema.

5.6 REPRESENTACIÓN: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO USANDO MCDs

La representación de la conducta del experto en la toma de decisiones en una situación de emergencia constituye la construcción del modelo usando los MCDs y comprende los siguientes puntos:

- Análisis cognoscitivo de tareas (ACT)
- Identificación de los nodos del modelo
- Establecimiento de Relaciones entre los nodos
- Mapa cognoscitivo y matriz de relaciones

5.6.1 Análisis cognoscitivo de tareas (ACT)

El ACT permite obtener los componentes cognoscitivos de una tarea:

- conocimiento declarativo
- técnicas y procedimientos
- estrategias y modelos mentales

Para nuestro caso de estudio, la tarea de un supervisor consiste en tomar decisiones para mantener la operación normal de la planta. Que en el caso de estudio, se concentra solo en el escenario de pérdida de refrigerante LOCA pequeño (*sección 4.1*).

El conocimiento declarativo se refiere básicamente a hechos que no guardan relación con un uso especializado para un caso particular, es como decir *el nivel del agua del pozo seco se encuentra en rango 1*, esta frase representa un hecho concreto y aislado, mientras no exista el modelo mental que lo relacione con un modo de operación normal o anormal.

En esta tarea el conocimiento declarativo consiste en las lecturas de cada uno de los parámetros involucrados en la supervisión.

Los procedimientos y estrategias, en el caso de estudio, se encuentran en la guía de procedimientos en emergencia (GPE), sólo que para identificar qué estrategia es la más conveniente es importante tomar en cuenta los modelos mentales que el experto utiliza para hacerlo, pues a pesar de lo detallado de las guías, siempre existe cierta incertidumbre inherente al proceso como se muestra en el diagrama de la Figura 5.1.

Los modelos mentales son representaciones conceptuales del experto, obtenidas por la experiencia que le permiten: describir el problema, analizarlo y resolverlo, usando representaciones muy diversas como grafos, descripciones, ecuaciones básicas, etc. Los modelos mentales constituyen la diferencia más notable entre el experto y el aprendiz. Son esenciales para la transformación del aprendiz a experto. Es en este componente en el que nos basamos para obtener la conducta del experto utilizada en la representación de los mapas cognoscitivos difusos.

El ACT se realiza por etapas, en cada etapa los modelos obtenidos son refinados. En el caso de estudio las primeras etapas permiten establecer un modelo mental del experto sobre el escenario de emergencia LOCA pequeño.

1ra etapa del análisis:

Consiste en una primera aproximación en la determinación del escenario LOCA pequeño y las consecuencias posibles que se derivan de dicho escenario:

Entender el escenario LOCA pequeño con ayuda de los expertos y de la literatura proporcionada por los mismos, nos permitió desglosarlo principalmente en tres puntos, los cuales se describen a continuación:

- a) Identificar los *parámetros que indican la entrada al escenario de emergencia LOCA pequeño*. Entrar a este escenario significa que es necesario mitigar los efectos producidos por dicho escenario.
- b) Para *mitigar los efectos*, es necesario que los principales *sistemas mitigantes, como HPCS*, se encuentren disponibles, es decir, funcionando. Para determinar el funcionamiento de este sistema, se identifican los elementos que permiten indicar la posibilidad del buen funcionamiento o de la falla del sistema HPCS.
- c) Además de HPCS, es necesario identificar otros elementos que intervienen en la mitigación de los efectos de un escenario de emergencia como LOCA pequeño. Conocer cómo interactúan estos elementos permite determinar como posible consecuencia el éxito en la mitigación de los efectos y con ello el buen estado del núcleo y contención. También existe la posibilidad de fallas en los sistemas de mitigación, causando que el núcleo y la contención sufran daño.

2da etapa del análisis:

A partir del planteamiento de la etapa 1 donde se identificaron tres puntos importantes, en esta segunda etapa se detalla cada uno de ellos.

- a) **Análisis de Parámetros:** Consultando con el experto y las guías de procedimientos en emergencia (*sección 4.2*), se identifican los parámetros que son controlados en una emergencia:

Nivel de agua en la vasija
Presión en la vasija
Potencia del reactor
Temperatura de la alberca de supresión
Presión de la contención primaria
Temperatura del pozo seco
Nivel de agua en la alberca de supresión

El procedimiento de control del reactor, establece tres trayectorias paralelas de acción, una para cada uno de los parámetros que están siendo controlados (*presión de la vasija, nivel de la vasija y potencia del reactor*). Debido a que las acciones tomadas para controlar cualquiera de los parámetros afecta el control de los otros, los tres parámetros deben ser controlados de forma concurrente, esto es, el nivel de agua en la vasija del reactor no puede ser estabilizado y mantenido dentro de una banda especificada, si la presión en la vasija está oscilando, y a su vez, la presión en la vasija no puede ser estabilizada ni controlada adecuadamente, si la potencia del reactor está variando.

Las acciones de control sobre los parámetros son encaminadas a la protección del núcleo y de la contención primaria:

Protección del núcleo

Las acciones para controlar el *nivel de agua en la vasija* establecen el adecuado enfriamiento del núcleo manteniendo éste inundado.

Las acciones para el control de la *presión en la vasija* estabilizan la presión ayudando a controlar el *nivel de agua en la vasija* y, en caso necesario, *despresurizar y enfriar la vasija* hasta condiciones de parada fría.

La acción para controlar la *potencia del reactor* si el SCRAM (acción automática del sistema de protección del reactor vista en la *sección 4.2*) falla, es reducir la potencia del reactor con la inserción manual de barras de control y la inyección de boro.

Protección de la contención primaria

Las acciones tomadas para controlar cualquiera de los parámetros clave de la contención primaria (presión, temperatura en pozo seco y húmedo y nivel en el pozo húmedo) pueden afectar directamente el control de los otros parámetros y por esto todas las acciones son ejecutadas de forma concurrente. Específicamente:

- Los cambios en la *temperatura de la alberca de supresión* pueden producir directamente cambios en la *presión de la contención primaria*.
- Los cambios en la *temperatura del pozo seco* pueden producir directamente cambios en la *presión de la contención primaria*
- Los cambios del *nivel de agua de la alberca de supresión* pueden producir directamente cambios en la *presión del pozo*.

Si la *temperatura de la alberca de supresión* permanece debajo del valor de la condición limitante de operación más restrictiva no se requieren mayores acciones del operador. Entonces, la acción es continuar con el proceso de monitorización y controlando la temperatura de la alberca de supresión utilizando los sistemas disponibles de enfriamiento de la alberca de supresión.

La acción inicial tomada para controlar el nivel de agua de la alberca de supresión emplea los mismos métodos usados típicamente durante la operación normal de la planta: monitorear su estado, y llenar o drenar la alberca de supresión como se requiera para mantener el nivel dentro de los límites dados por Especificaciones Técnicas.

- b) Sistema HPCS: Con ayuda del experto se identifican los siguientes elementos que intervienen para el funcionamiento adecuado de dicho sistema y por consecuencia de la vasija (*sección 4.3*).

Válvula del reactor
 Válvula del tanque
 Válvula de alberca de supresión (manual)
 Bomba

La válvula del reactor permite la alimentación del agua de los depósitos (tanque y alberca) para mantener una temperatura estable del reactor mediante el enfriamiento del mismo cuando la temperatura supera los niveles aceptables. Además, esta válvula, dada la relación existente entre las variables: temperatura y presión, también influye en el mantenimiento de la presión dentro de la vasija del reactor. Por lo anterior, una *falla de la válvula del reactor (A1)* constituye una falla de primer orden, es decir, una falla cuyo efecto causa una falla total del sistema dejándolo fuera de funcionamiento *por ello el sistema HPCS falla y por consiguiente la vasija queda en mal estado*.

La *válvula del tanque (Válvula de Tx)* permite la alimentación del agua de dicho depósito (Tx) hacia el reactor por lo que forma parte del sistema de enfriamiento, dicho de otro manera, si se presenta una *falla en la válvula del tanque (A2)*, ésta afecta el funcionamiento del sistema HPCS, sin embargo esta relación no es

determinante, debido a que el tanque no es el único depósito con el que se cuenta para suministrar el agua necesaria para mantener el sistema HPCS funcionando.

La *válvula de la alberca (Válvula de Ax)* permite la alimentación del agua del segundo depósito (Alberca) con el que cuenta el sistema de enfriamiento para llevarla hacia el reactor. Por lo anterior una *falla de la válvula de la alberca (M)* afecta al funcionamiento del sistema HPCS y al igual que la relación anterior no lo hace de forma determinante, debido a que la alberca no es el único depósito con el que se cuenta para suministrar el agua necesaria para mantener el sistema HPCS funcionando.

La *bomba* permite la succión del agua de cualquiera de los dos depósitos con los que se cuenta para que el sistema HPCS realice el enfriamiento necesario, por lo que una *falla de la bomba (B)* es una falla de primer orden debido a que causa directamente la falla total del sistema HPCS.

El *funcionamiento del sistema HPCS* constituye el elemento *principal* del modelo, pues tiene un efecto positivo sobre el elemento objetivo, esto es, mantener a la Vasija en buen estado. El resto de los elementos de este sistema: bomba y válvulas, intervienen para que el sistema HPCS se mantenga en buen funcionamiento, por lo que una falla en dichos elementos afecta el funcionamiento del sistema.

El *buen estado de la vasija* implica un reactor funcionando correctamente y este estado depende directamente del funcionamiento del sistema HPCS lo que significa el buen funcionamiento de la bomba y las válvulas que intervienen en dicho sistema.

c) Elementos mitigantes de LOCA pequeño:

Además del sistema HPCS, existen otros elementos que también intervienen en la mitigación de los efectos de la emergencia LOCA pequeño (*sección 4.1*) y son los siguientes:

Válvula de alivio (P)
 Válvula manual (O1)
 Supresor de vapor (SV)
 HPCS o RCIC
 Despresurizador. (X1)
 Sistemas a baja presión (V): Condensador (V1), LPCS (V2),
 LPCI(V3) y NWS ligado a LPCI (V4)
 RHR (W) utilizando SPC (W1), SDC (W2) y CSC (W3)
 Venteo (Y)
 Fuga (R)

Los sistemas y elementos señalados en este inciso, tienen como finalidad durante la emergencia, regresar la operación de la planta a un estado normal, es decir, un núcleo y contención primaria en buen estado (*sección 4.4*). El trabajo conjunto entre tres o más elementos dependerá del éxito que cada uno tenga para mitigar los efectos de la emergencia LOCA pequeño. El éxito, significa que el núcleo quedará en buen estado y la contención primaria estabilizada. En ocasiones es posible lograr el éxito de un núcleo en buen estado hasta después de pasar por un proceso de contención venteada o fugada. Incluso puede darse el caso que el proceso de fuga falle (contención fallada) y aún así, si los sistemas mitigantes sobreviven, es posible que el núcleo quede en buen estado. También se considera la posibilidad de que no ocurra la mitigación deseada y obtener como consecuencia de ello, el daño del núcleo y la vulnerabilidad de la contención primaria.

Las válvulas P y 01 tienen relación conjuntamente con los sistemas de alta presión HPCS y RCIC para propiciar el éxito en la mitigación.

Por su parte, la no disponibilidad de los sistemas de alta presión HPCS causa la entrada del despresurizador X1, y una vez que la presión haya bajado, entran inmediatamente los sistemas a baja presión V y el sistema removedor de calor W. Lo anterior origina el éxito en la mitigación.

La no disponibilidad del sistema removedor de calor W, origina el funcionamiento del despresurizador X1, para enseguida entrar en acción los sistemas a baja presión V conjuntamente con la operación de venteo Y. Con ello es posible que el núcleo quede en buen estado con una contención venteada.

La situación más crítica es cuando el despresurizador X1 o los sistemas a baja presión V fallan, porque una falla de cualquiera de los dos, origina el daño en el núcleo y la vulnerabilidad de la contención.

Por otro lado, el que los sistemas permanezcan operando a pesar de la emergencia, origina el buen estado del núcleo. En caso contrario, si estos sistemas no sobreviven, automáticamente provocarían el daño en el núcleo y la contención podría estar venteada, fugada, fallada o incluso vulnerable.

Una falla en la ventilación Y de la contención origina un proceso de fuga R, causando una contención denominada fugada.

El proceso de ventilación Y genera automáticamente una contención venteada.

Una falla del proceso de fuga R genera una contención fallada.

Una falla en la válvula manual 01 provoca que entre en acción inmediata el sistema removedor de calor W. La operación del removedor de calor garantiza siempre un núcleo y contención en buen estado.

Una falla en la válvula de alivio P causa que entre en acción el supresor de vapor SV en conjunción con el sistema removedor de calor, con esta acción conjunta aumenta la posibilidad de lograr una mitigación exitosa.

El sistema removedor de calor W entra en acción siempre que haya bajado la presión del reactor, de manera que antes de operar, cualquiera de los que operan a alta presión (HPCS, RCIC o X1) deben de estar funcionando.

3ra etapa del análisis:

De los incisos anteriores se obtuvieron modelos mentales más refinados, representados por las Figuras 5.3, 5.4, 5.5a y 5.5b. Estos modelos mentales son utilizados para la siguiente etapa, donde se establece propiamente el análisis cognoscitivo de tareas.

Si (TempAlbercaCambia o TempPozoCambia) **Entonces**
PresiónContenciónCambia

FinSi

Si (NivelAlbercaCambia) **Entonces**
PresiónPozoCambia y TempPozoCambia

FinSi

Si (PotenciaReactorVaría) **Entonces**
PresiónVasijaVaría

FinSi

Si (PresiónVasijaOscila) **Entonces**
NivelVasijaInestable

FinSi

Si (NivelVasijaControlado) **Entonces**
PresiónPozoControlado & TempPozoControlado & *Núcleo en buen estado*

FinSi

Si (TempAlbercalnestable) **Entonces**
NivelAlbercalnestable & *Contención no estable & Núcleo posiblemente afectado*

FinSi

Tratándose de eventos concurrentes, se requieren trayectorias de acción paralelas. Por ello hasta aquí es el **Paso 1**

Si (posible-nucleo-afectado) **Entonces**

PotenciaReactorVaría
Contención no estable
Emergencia LOCApequeño

FinSi

Paso 2

Fig. 5.3. Modelo mental del análisis de parámetros

Si (B o A1 o (A2 y M)) **Entonces**
HPCS falla y Vasija en mal estado

SiNo Si (A2 o M) **Entonces**
HPCS funciona y Vasija en buen estado

FinSiNo

Paso 3

Paso 4

Fig. 5.4. Modelo mental del sistema mitigante HPCS

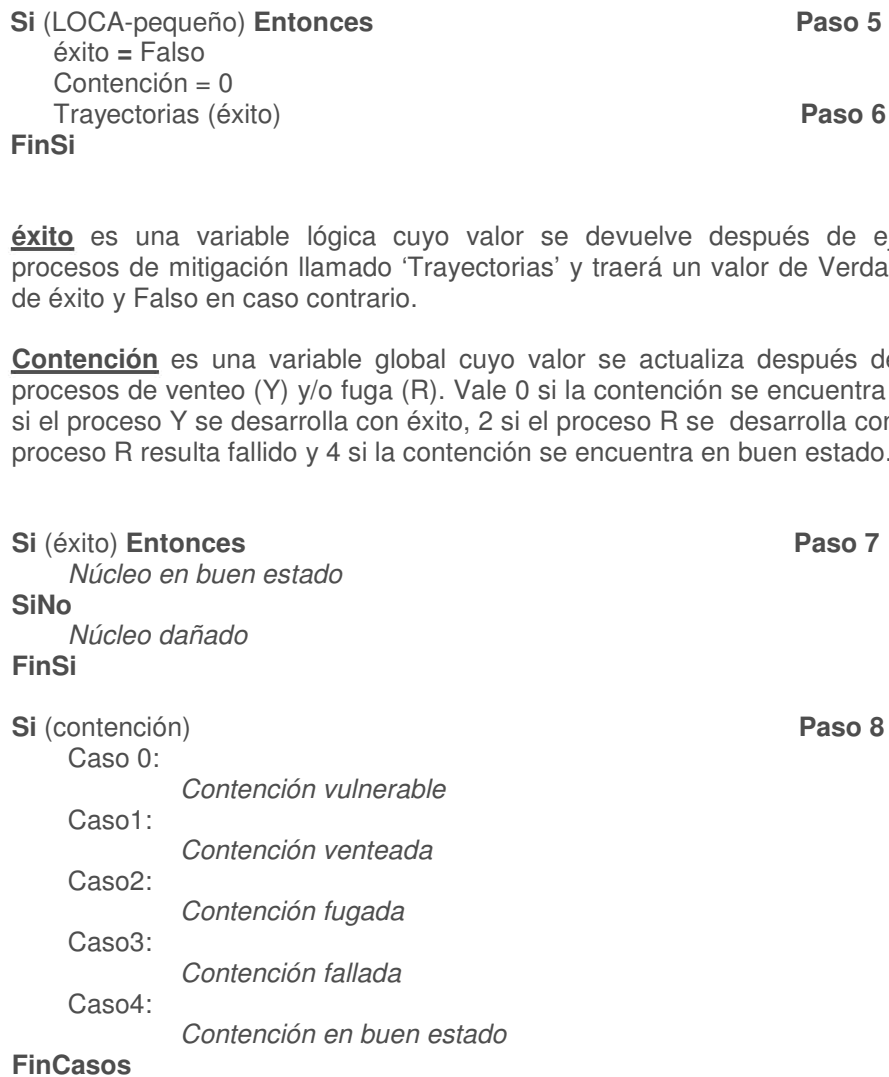


Fig. 5.5a. Modelo mental del escenario LOCA pequeño: entrada y resultados

Si (P y 01 y (HPCS o RCIC)) **Entonces**

éxito=Verdadero

Contención=4

FinSi

Si (\neg HPCS y \neg RCIC) **Entonces**

X1 y V

W

éxito=Verdadero

Contención=4

FinSi

Si (\neg W) **Entonces**

X1 y V

Y

SUR

éxito=Verdadero

Contención=1

FinSi

Si (\neg V o \neg X1) **Entonces**

éxito=Falso

Contención=0

FinSi

Si (\neg SUR) **Entonces**

éxito=Falso

FinSi

Si (\neg Y) **Entonces**

R

Contención=2

FinSi

Si (\neg R) **Entonces**

Contención=3

FinSi

Si (\neg 01) **Entonces**

W

éxito=Verdadero

Contención=4

FinSi

Si (\neg P) **Entonces**

SV

W

éxito=Verdadero

Contención=4

FinSi

Fig. 5.5. b) Modelo mental del escenario LOCA pequeño: trayectorias.

Los modelos mentales obtenidos ponen de manifiesto las relaciones y la causalidad entre los diferentes conceptos y elementos que el experto maneja para enfrentar una emergencia como LOCA pequeño.

En la Figura 5.3, aparecen los parámetros y sus condiciones (estables o inestables) que determinan, la entrada o no, a una emergencia como LOCA pequeño.

En la Figura 5.4, aparecen los elementos que determinan el funcionamiento o falla de uno de los principales sistemas mitigantes (HPCS) de una emergencia como LOCA pequeño.

En la Figura 5.5a aparecen, una vez determinada la emergencia LOCA pequeño, las condiciones en que se logra el buen estado de la contención y el buen estado del núcleo, así como las condiciones en que la mitigación no es suficiente y se obtiene la vulnerabilidad de la contención y el daño del núcleo. También se determinan condiciones para un buen estado del núcleo después de un proceso de venteo o fuga de la contención primaria.

En la Figura 5.5b aparecen las trayectorias, es decir, las interacciones posibles de los sistemas mitigantes para producir como consecuencia el éxito en la función de mitigar los efectos de una emergencia como LOCA pequeño. Además se observan las condiciones en que no se produce el éxito deseado.

Es importante señalar, que tanto el modelo mental de la Figura 5.3 como el de la Figura 5.4, alimentan los modelos mentales de las Figuras 5.5a y 5.5b respectivamente. Lo anterior significa que el modelo mental de la Figura 5.3 indica si existe LOCA pequeño o no. A partir de ello, se desarrolla el modelo mental de la Figura 5.5a. El modelo mental de la Figura 5.4 por su parte, indica la disponibilidad o no del principal sistema mitigante HPCS para enfrentar la emergencia. Esta información es utilizada por el modelo mental de la Figura 5.5b.

4ta etapa del análisis:

En esta etapa, inicia propiamente el ACT y se basa en los modelos mentales refinados obtenidos en la etapa anterior.

El análisis cognoscitivo de tareas se resume en una tabla que consta de las siguientes columnas [2, 3, 18, 21]:

- Pasos del Desarrollo.
- Contenido de los pasos.
- Formas de Evaluación.
- Tipo de Representación.
- Complejidad de los Procesos que subyacen a la evaluación.

Pasos del desarrollo

Este procedimiento permite descubrir los diferentes conjuntos de conocimiento que interactúan en un sistema experto como el propuesto. Para ello, se utilizan los modelos mentales con los que trabaja el experto durante la toma de decisiones. A partir de estos modelos se extraen los pasos del procedimiento. (Figuras 5.3, 5.4, 5.5a y 5.5b). Así tenemos que los pasos del desarrollo de todos los modelos mentales son:

- Verificar variaciones de parámetros
- Determinar si hay o no emergencia LOCA pequeño
- Verificar estado de los elementos que conforman el sistema HPCS
- Determinar si HPCS funciona o falla
- Verificar estado de los sistemas mitigantes (incluido HPCS)
- Determinar trayectoria mitigante a seguir
- Determinar resultado de la mitigación

Contenido de los pasos

En esta columna se indica el tipo de conocimiento que va a contener cada uno de los pasos y que se clasifica en: factual (hechos), conceptual, procedural (procedimientos), estratégico (coordinación de acciones encaminadas a un objetivo) y táctico

(subordinado a la estrategia, es la parte ejecutiva de la estrategia). Esta columna juega un papel importante dado que su obtención se puede centrar en conocimiento declarativo o procedural, según sea el caso.

Formas de evaluación

Poder conocer cómo se va a evaluar una determinada actividad conduce a establecer la competencia de los diferentes niveles de abstracción. Esta parte está representada por la comunicación entre los diferentes conjuntos de conocimiento, en caso de que exista; si no existe la evaluación, será diferente.

Tipo de representación

Su función es tratar de organizar el conocimiento experto. Este conocimiento posteriormente es detallado en la columna de contenido de los pasos, aquí vale la pena aclarar que la psicología cognoscitiva cuenta con su propia definición. Las estructuras son consideradas como componentes estáticos del sistema (entidades funcionales) y los procesos son componentes dinámicos que se refieren a la actividad del sistema cognoscitivo (pensar, solucionar problemas, etc.).

Complejidad de los procesos que subyacen a la ejecución

En esta columna se clasifica la complejidad en:

- discriminación (simple y múltiple): subproceso que permite diferenciar entre clases de cosas.
- Generalización: subproceso que permite establecer con precisión el rango en el que lo diferenciado es aplicable. Por ejemplo, determinar si un parámetro está fuera del rango de operación normal de la planta.
- Categorización conceptual (vertical, horizontal): subproceso gracias al cual establecemos clases entre las cosas que nos rodean y somos capaces de organizar categóricamente nuestro mundo.
- Integración del conocimiento en micro y macroestructuras: proceso constructivo gracias al cual continuamente estructuramos nuestro conocimiento, con la finalidad de integrar conocimientos provenientes del material estudiado con la representación personal, derivada de la experiencia particular.
- Solución de problemas (baja y alta complejidad): procesos gracias a los cuales se operan los conocimientos y habilidades de una manera original, para solucionar situaciones novedosas, o no conocidas.

De lo anterior se obtiene la Tabla 5.1 que engloba el ACT y que permitirá obtener los elementos esenciales para estructurar el sistema experto.

Tabla 5.1. Especificación del ACT de la toma de decisiones experta en LOCA pequeño.

Pasos del desarrollo	Contenido de pasos	Tipo de representación
1. Verificar variaciones de parámetros físicos Paso 1	Factual	Estructuras
2. Determinar si hay o no emergencia Paso 2	Conceptual y procedural	Estructuras y procesos
3. Verificar estado de los elementos que conforman HPCS Paso 3	Factual	Estructuras
4. Determinar si HPCS funciona o falla Paso 4	Conceptual y procedural	Estructuras y procesos
5. Verificar el estado de los sistemas mitigantes Paso 5	Factual	Estructuras
6. Determinar trayectoria mitigante a seguir Paso 6	Estratégico y procedural	Estructuras y procesos
7. Determinar resultado de la mitigación Pasos 7 y 8	Conceptual y procedural	Estructuras y procesos

5ta etapa del análisis

En esta etapa se hace una refinación del análisis de la etapa anterior con la finalidad de obtener con más detalle el conocimiento conceptual y las habilidades necesarias para realizar las tareas [18, 21].

Conocimiento conceptual

Este componente está representado por la columna de contenido de los pasos. Incluye además del tipo de conocimiento del dominio, sus interrelaciones, así como, las reglas y procedimientos que complementen el trabajo de forma verbal.

Habilidades

Este componente incluye todos los tipos de conocimiento procedural, así como las habilidades que se requieren para la operación de la planta. También incluye las estrategias de desarrollo. Este componente es importante porque permite una mayor descomposición de las habilidades de forma jerárquica. Así la habilidad estratégica contiene a la táctica y las procedurales pueden descomponerse en otras más específicas de acuerdo al paso a ser iterado.

Este análisis considera al trabajo como un todo, donde estas habilidades pueden o no corresponder con tareas individuales, o ser parte de una sola tarea. El componente de habilidades es analizado, descomponiendo las tareas involucradas en una secuencia

de pasos. En caso en que el procedimiento sea cognoscitivo, se centra el procedimiento en los procesos mentales, como es nuestro caso de estudio.

A continuación se describe la taxonomía de habilidades propuesta por Ryder y Redding [5, 21):

- Reconocimiento de patrones: se refiere a la identificación y clasificación de información que proviene de los sentidos (ejemplo la visión).
- Estratégico: se refiere a las decisiones tomadas en la resolución de problemas. Incluye procesamiento central y trata primeramente con los datos verbales y/o estímulos no predecibles. Este es utilizado para elegir la trayectoria a seguir.
- Motor Grueso: se refiere a los movimientos musculares, donde los requerimientos de decisión son mínimos. Se ejecutan en respuesta a una situación relativa a un estímulo estático (sentidos musculares y excitación del oído interno: kinesthetic).
- Motor Perceptual: se refiere a movimientos continuos, o donde el control de los movimientos depende de entradas perceptuales dinámicas. Incluye componentes perceptuales y motores.
- Procedurales: se refieren a la secuencia de acciones motoras o cognoscitivas en situaciones predecibles. Tienen baja demanda cognoscitiva, en el caso de acciones motoras. Esta habilidad es utilizada en las comparaciones de los parámetros físicos, en el seguimiento de las GPE vistas en la 2da etapa del ACT.
- Interactivas: incluyen habilidades inter-personales como en el caso de comunicación, persuasión y supervisión. Esta habilidad también es utilizada debido a la tarea de supervisión y control de los diferentes elementos involucrados o afectados en una emergencia como LOCA pequeño.
- Habilidades integradas y de tiempo compartido: se refiere a la integración de varias habilidades en la realización de una sola tarea y a la atención que se produce cuando se cambia de tarea en un procedimiento multi-tarea. Está basada en estudios de condiciones de transferencia de tarea sencilla a tarea doble. Este tipo de estudio es importante en trabajos con alta carga de condiciones y existe la necesidad de coordinar tareas y habilidades. Esta podría ser utilizada durante la elección, seguimiento y evaluación de la trayectoria de mitigación (combinación de sistemas utilizados)

Debido a la diferencia entre estrategia y táctica se propone otro tipo de habilidad.

- Tácticas: se ubican en un nivel subordinado al estratégico y representan la toma de decisiones en la resolución de problemas de forma inmediata. La estrategia involucra el orden en el que se utilizarán las tácticas. La etapa táctica se inicia una vez decidida la estrategia.

Se obtiene una tabla por cada componente, y cada uno puede ser iterado, si hay más habilidades o conocimientos subyacentes. Lo anterior significa que puede refinarse a tal grado que el conocimiento experto tácito quede explicitado.

Tabla 5.2. Especificación del ACT de la toma de decisiones experta en el escenario LOCA pequeño de acuerdo al conocimiento conceptual.

Conocimiento conceptual	Interrelaciones, Reglas y procedimientos	Representación conceptual
Parámetros físicos: temperatura, presión, nivel, potencia.(GPE)	- Relación entre temperatura, presión y nivel de agua en alberca, pozo y contención - Relación entre potencia del reactor, nivel vasija	Pasos 1 y 2
Sistemas mitigantes (Guía técnica específica y GPEs)	- Relación entre los sistemas mitigantes de acuerdo a la presión, válvulas, bomba, y otros sistemas mitigantes	Pasos 3, 4, 5, 6, 7 y 8

Tabla 5.3. Especificación del ACT la toma de decisiones experta en el escenario LOCA pequeño de acuerdo a las habilidades necesarias.

Habilidades	Conocimiento necesario	Representación conceptual
Procedural	- Variaciones de los parámetros físicos - Relaciones entre los diferentes parámetros físicos: presión, temperatura, nivel de agua, potencia	Paso 1
Procedural e Interactiva	- GPEs	Paso 2
Procedural e interactiva	- Estado de bomba y válvulas - Relación entre sistema mitigante, válvula, bomba - Guía técnica de sistemas mitigantes	Pasos 3 y 4
Procedural	- Estado de emergencia - Estado de sistemas mitigantes	Paso 5
Estratégico, interactivo y procedural	- Trayectorias posibles de acuerdo a los sistemas disponibles - Guía técnica de sistemas mitigantes y GPEs.	Paso 6
Procedural e interactivo	- GPEs	Pasos 7 y 8

Las *habilidades procedurales* en la Tabla 5.3 son necesarias para verificar el estado de cada uno de los elementos involucrados en cada parte del análisis. De manera que permiten establecer si los parámetros están variando de manera normal o anormal y si los sistemas mitigantes están disponibles.

El resultado de aplicar las *habilidades procedurales* es contar oportunamente con el conocimiento necesario en la aplicación de las *habilidades interactivas*, porque estas habilidades son necesarias para realizar la tarea de supervisión y control de la operación.

Finalmente las *habilidades estratégica y táctica* son necesarias en la determinación de la trayectoria de mitigación a seguir de acuerdo a la disponibilidad e interacción de los diversos sistemas mitigantes. La habilidad estratégica permite la iteración (Tabla 5.4) debido a que tiene subordinada la habilidad táctica.

Tabla 5.4. Especificación del ACT la toma de decisiones experta en el escenario LOCA pequeño de acuerdo a las habilidades necesarias (1ra iteración).

Habilidades	Conocimiento necesario	Representación conceptual
-	-	Paso 1
-	-	Paso 2
-	-	Pasos 3 y 4
-	-	Paso 5
Táctico	- Resultados de trayectorias seguidas.	Paso 6
-	-	Pasos 7 y 8

6ta etapa del análisis

En esta etapa se obtiene la gráfica genética (GG). La GG propuesta por Ira Goldstein [18, 21], es una herramienta para representar el conocimiento basada en la epistemología genética de Jean Piaget.

De manera general la **GG** muestra el conocimiento (de cualquier tipo) agrupado en islas y enlaces para relacionarlas. Estos enlaces pueden ser de orden o de inclusión, como en el caso de las jerarquías anidadas de Gagné. En nuestro caso sólo desarrollamos las propiedades de representación del conocimiento y su tipo de enlace, así como el orden de presentación de las habilidades.

Los enlaces que se utilizan en esta gráfica son los siguientes, aunque pueden ampliarse de acuerdo a las necesidades del dominio a modelar.

1. PreCond : este enlace implica un orden de precedencia **antes que**.
2. PostCond: este enlace implica un orden de posterioridad, un conocimiento al que se puede acceder **después de** cubrir el conocimiento al que esta enlazado
3. Anlg: **analogía**; cuando dos islas están enlazadas por este tipo de enlace, existe una correspondencia de las constantes de una isla a las constantes de la otra isla.
4. Comp: **componente**; este enlace implica que un conocimiento o habilidad está **compuesto por** otro componente.
5. Clase: la **Clase** implica la existencia de una jerarquía conceptual o de habilidades.
6. SubClase: la **SubClase** implica la existencia de niveles de granularidad en la definición de abstracciones conceptuales o de habilidades.
7. EsEl/EsLa/EsUna/En: El enlace **EsEl o EsLa o EsUna o En**, representa la descripción de un componente específico de acuerdo al dominio en cuestión.

Los enlaces entre las islas, explicitan las relaciones, y los datos de entradas y salidas que habrá entre las islas y los diferentes niveles de abstracción, (pueden o no existir) que representan la ejecución del Sistema experto.

En esta etapa, como en las anteriores, es necesario establecer los tipos de conocimiento que se manejan de acuerdo al tipo de acciones a realizar. Del conocimiento procedural, por ejemplo, se derivan acciones o comportamientos básicos. Sobre los comportamientos básicos se pueden desarrollar comportamientos más sofisticados.

Los tipos de conocimiento observados en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 que pueden derivar en acciones son los siguientes:

Conocimiento factual:

- F1 Tipo de parámetros físicos
- F2 Variaciones de parámetros físicos
- F3 Tipo de bomba y válvulas
- F4 Estado de bomba y válvulas
- F5 Tipos de sistemas mitigantes
- F6 Estado de los sistemas mitigantes

Conocimiento procedural:

- P1 Cómo se afectan unos y otros parámetros
- P2 Cuándo se declara una emergencia
- P3 Cómo afecta la bomba y las válvulas al sistema mitigante HPCS
- P4 Cómo interactúan los sistemas mitigantes entre sí
- P5 Cómo saber si la mitigación fue un éxito o falló.

Acciones:

- A1 Analiza parámetros
- A2 Analiza sistema HPCS
- A3 Mitiga

De acuerdo al ACT se obtiene el grafo conceptual de la Figura 5.6.

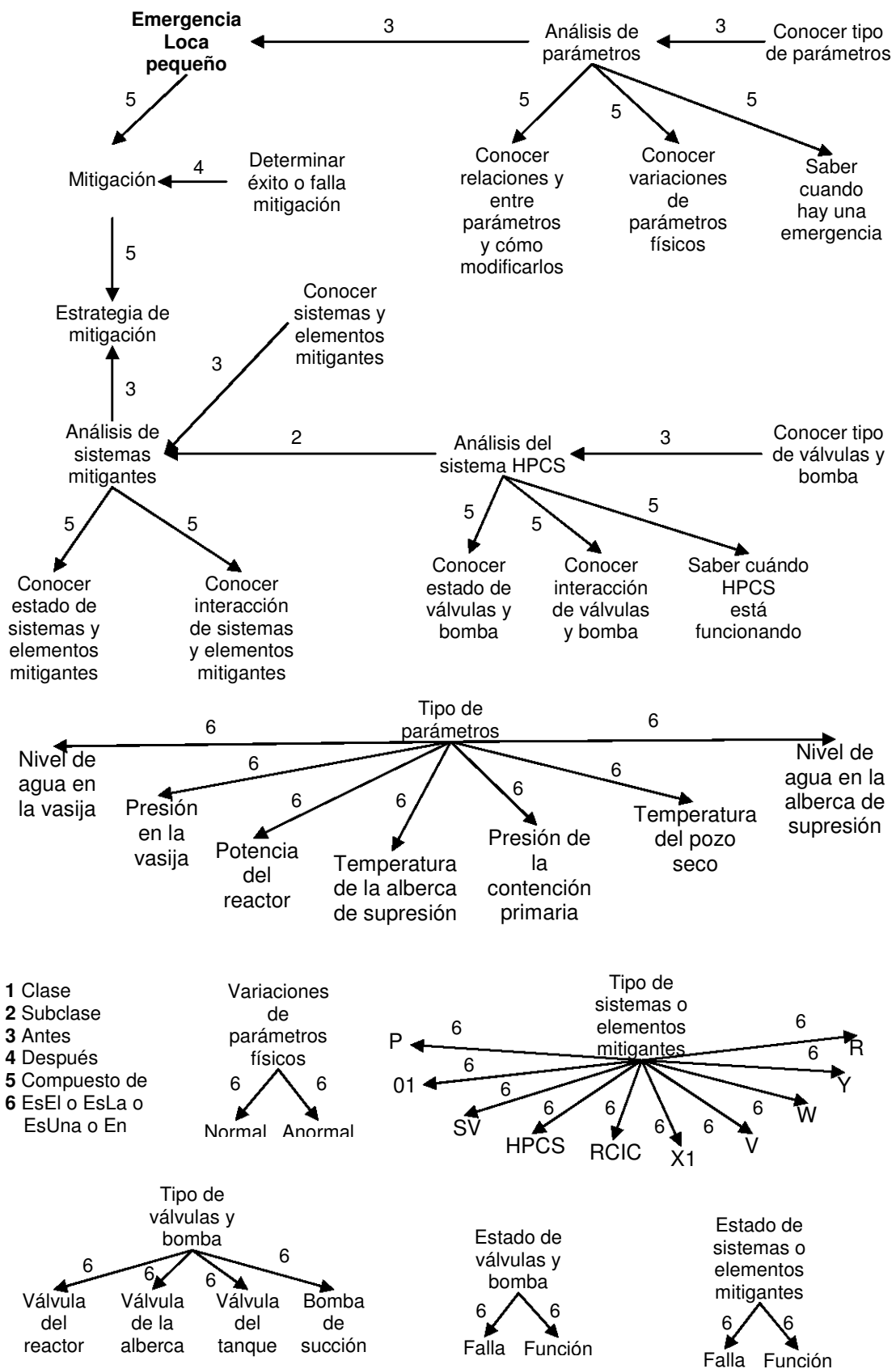


Fig. 5.6. Diagrama conceptual del dominio de acuerdo al ACT

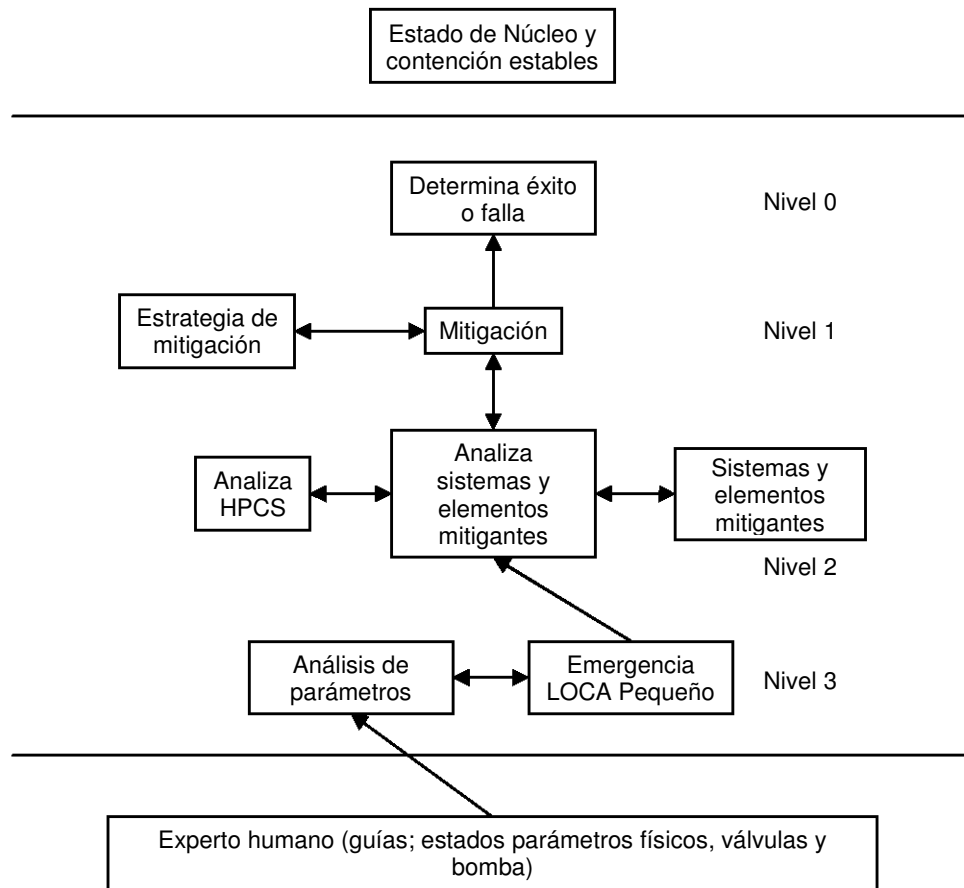


Fig. 5.7. Diagrama conductual

Basándonos en la Figura 5.6, se obtiene el desarrollo de la conducta cognoscitiva del experto que se puede observar en la Figura 5.7. El objetivo de esta conducta es regresar la operación de la planta (núcleo y contención) a un estado normal (equilibrio de los niveles de parámetros físicos), ante una emergencia como LOCA pequeño. El experto humano toma en consideración las GPEs, los estados de parámetros físicos, de válvulas y bomba; de manera que ante cualquier variación en ellos, lleva a cabo un análisis de parámetros (nivel 3). Como parte de este análisis, el experto toma en consideración las relaciones entre los diferentes parámetros así como el efecto que cada uno de ellos produce sobre el resto. A partir de dichas relaciones y efectos, en conjunción con las GPEs se determina la entrada a una emergencia como LOCA pequeño (nivel 3). Si no hay emergencia, el experto solo continúa monitorizando la operación sin hacer ninguna otra acción. En caso contrario, de producirse una emergencia como LOCA pequeño, realiza un análisis de los sistemas y elementos que intervienen en la mitigación de efectos derivados de una emergencia (nivel 2). Para ello necesita analizar el sistema HPCS como principal sistema mitigante en función de la operación de válvulas y una bomba de succión, determinando con ello su disponibilidad (nivel 2). Una vez conocida la disponibilidad de los sistemas y elementos mitigantes, el experto considera la relación y efecto de cada uno de ellos sobre el resto y sobre la operación (nivel 2) para el proceso de mitigación (nivel 1). Durante este proceso se determina una estrategia de mitigación (nivel 1) con la ayuda de las GPEs y guías técnica de los sistemas. Como resultado del proceso se determina el éxito o falla de los sistemas mitigantes para alcanzar el objetivo: restaurar el equilibrio de operación de la planta (núcleo y contención en buen estado).

Para representar esta conducta se desarrollan tres MCDs, uno por cada modelo mental. Cada mapa mostrará explícitamente las relaciones entre los conceptos manejados en el modelo mental respectivo. A continuación se describe este desarrollo.

5.6.2 Identificación de los nodos del modelo cognoscitivo

Los modelos mentales resultantes de las primeras etapas (1ra – 3ra) sirven de base para la identificación de los nodos que conformarán el mapa cognoscitivo difuso correspondiente.

Nodos del Análisis de parámetros

El modelo mental mostrado en la Figura 5.3, permite identificar los conceptos, representados por nodos, que la conducta del experto considera intervienen o se ven afectados durante una posible emergencia. Dichos nodos conformarán el primer mapa cognoscitivo inspirado en el sistema físico de la Figura 5.8. Así en este paso de la metodología se detectan los siguientes 9 nodos.

Tabla 5.5. Nodos identificados del modelo mental: Análisis de parámetros

1	NAV (Nivel de agua en la vasija fuera del rango aceptable)
2	PV (Presión en la vasija fuera del rango aceptable)
3	PR (potencia del reactor fuera del rango aceptable)
4	TAS (Temperatura de la alberca de supresión fuera del rango aceptable)
5	TPS (Temperatura de pozo seco fuera del rango aceptable)
6	PCP (Presión de la contención primaria fuera del rango aceptable)
7	NAS (Nivel de agua en la alberca de supresión fuera de rango)
8	RB (Reactor en buen estado)
9	CPE (Contención primaria estabilizada)

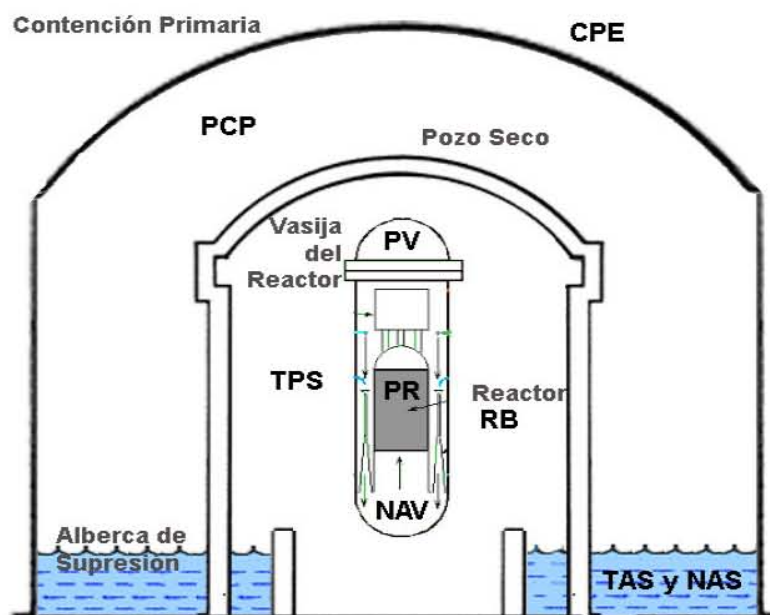


Fig. 5.8. Diagrama esquemático de un reactor BWR mostrando los elementos identificados como nodos

Nodos del Sistema HPCS dentro del escenario LOCA pequeño

A partir del modelo mental de la Figura 5.4 se identifican los 6 nodos de la Tabla 5.6 que conformarán el segundo mapa cognoscitivo e inspirado en el sistema HPCS representado por la Figura 5.9.

Tabla 5.6. Nodos del sistema HPCS

1	A1 (Falla de la válvula del reactor)
2	A2 (Falla de la válvula del tanque)
3	M (Falla de la válvula manual de la alberca)
4	B (Falla de la bomba)
5	HPCS funciona
6	Vasija en buen estado

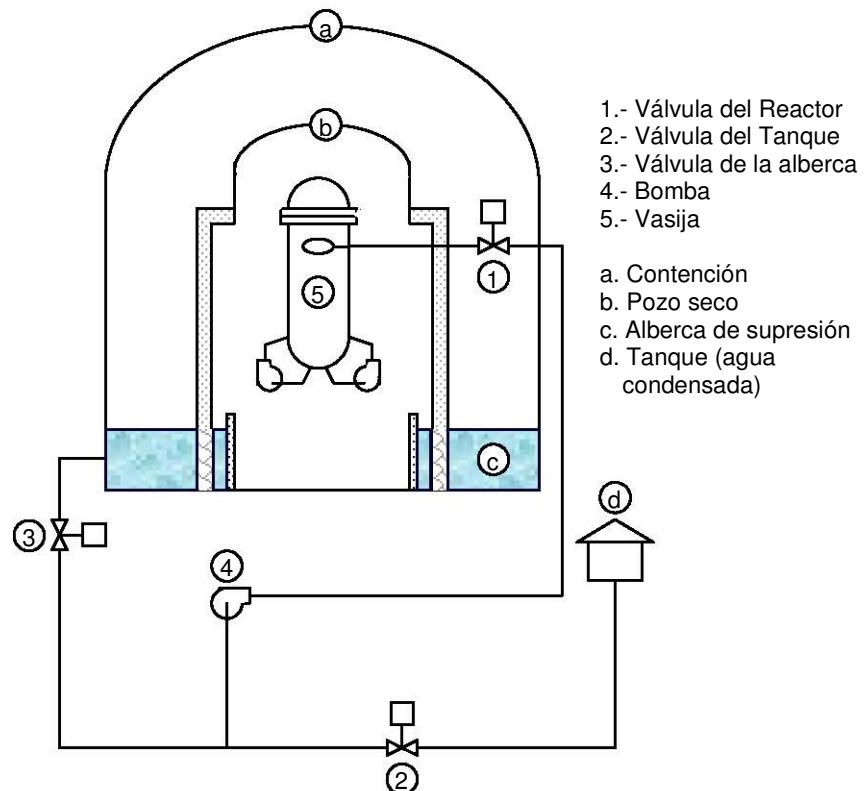


Fig. 5.9. Diagrama esquemático del Sistema HPCS

Nodos del escenario LOCA pequeño

El modelo mental mostrado en la Figura 5.5 a) y b), permite identificar los nodos para conformar el tercer mapa cognoscitivo. Este modelo mental está inspirado en el sistema físico de la Figura 5.10.

Tabla 5.7. Nodos identificados en el modelo mental: elementos mitigantes de LOCA pequeño

1	Cierre de válvula de alivio	P
2	Operador abre válvula para tener disponibilidad del condensador	O1
3	Supresor de vapor	SV
4	HPCS funciona	HPCS
5	RCIC funciona	RCIC
6	Despresuriza	X1
7	Condensador (V1), LPCS (V2), LPCI (V3) y NSW ligado a LPCI (V4)	V
8	RHR - funciones RHR SPC (W1), RHR SDC (W2) y RHR CSC (W3)	W
9	Venteo	Y
10	Fuga	R
11	Sobrevivencia de sistemas	SUR
12	Núcleo Bien	NB
13	Contención venteada	VT
14	Contención fugada	FG
15	Contención fallada	FL
16	Contención vulnerable	VN

La Figura 5.10 muestra de forma general el funcionamiento de una planta nucleoelectrica: generar energía eléctrica a partir del vapor que se obtiene al calentar el agua mediante el núcleo del reactor. *Mantener el funcionamiento del reactor en un escenario de falla implica activar los sistemas que mitigan dicho escenario de falla* [12, 26, 32, 33]. Los sistemas y mecanismos mitigantes están contenidos en la Tabla 5.7 de los nodos identificados. El escenario de falla a mitigar es la pérdida de refrigerante LOCA pequeño [12, 43].

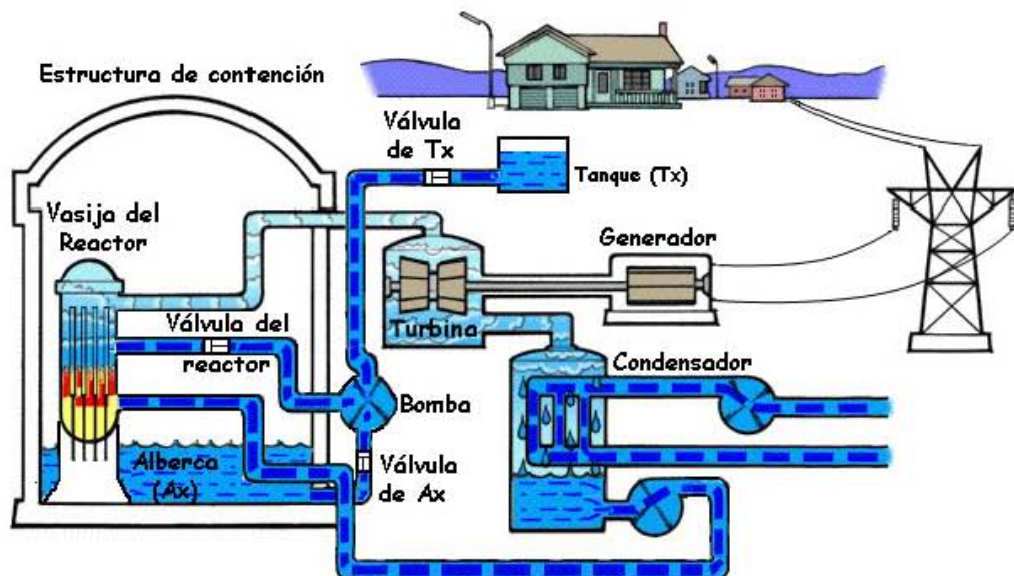


Fig. 5.10. Funcionamiento de una planta nucleoelectrica.

5.6.3 Establecimiento de relaciones entre los nodos

Para establecer las relaciones de causalidad entre los diferentes nodos, se tomó como base el análisis cognitivo de la conducta del experto, en especial los modelos mentales y el grafo conceptual obtenidos conjuntamente con el experto.

Las relaciones establecidas pueden ser de causalidad positiva o de causalidad negativa.

Relaciones de causalidad positiva y negativa

Causalidad positiva.

Si el efecto del incremento de uno sobre el otro es también un incremento proporcional, se trataría de una relación de causalidad positiva, lo mismo que si se tratara de un decremento en uno y causara el decremento proporcional en el otro. Por ejemplo, el incremento de la presión en la contención primaria causa un aumento en la temperatura.

La causalidad positiva también implica el efecto que un nodo tiene de aumentar la propiedad del otro nodo. Así podemos ver que un nodo puede tener una causalidad positiva sobre otro si tiende a estabilizarlo dentro de un rango normal de operación.

Causalidad negativa.

De lo contrario, si un incremento en uno causa el decremento proporcional del otro o al revés, si el decremento en uno causa el incremento proporcional del otro, entonces se trataría de una relación de causalidad negativa. Por ejemplo, la disminución de temperatura en la vasija del reactor puede producir un incremento en la potencia.

La causalidad negativa, también se refiere al efecto contrario que un nodo tiene sobre otro, es decir, un nodo puede causar la disminución en la propiedad que el otro nodo tiene. Tratándose de una causalidad negativa el efecto sería sacarlo del rango normal de operación, no importando si lo hace por encima o por debajo del mismo.

Para indicar estas causalidades numéricamente, las relaciones representadas por aristas (flechas) *toman valores dentro del rango* $(0, 1]$ *si es positiva*, $[-1, 0)$ *si es negativa* y 0 *si es neutra o no hay efecto* [13, 23].

Relaciones de causalidad entre los nodos del análisis de parámetros

De acuerdo a lo anterior, tenemos las siguientes relaciones de causalidad entre los nodos identificados:

Los 9 nodos identificados de la Tabla 5.5 guardan relaciones entre sí, mostradas tanto en el modelo mental de la Figura 5.1 como en los grafos conceptual de la Figura 5.4 y conductual de la Figura 5.5.

A partir del modelo mental referido y obtenido de los procedimientos de Control del Reactor y de Contención Primaria se establecen las relaciones de causalidad del tipo positiva o negativa de un nodo respecto del otro.

Temperatura fuera de rango. Se define como aquella temperatura diferente a la establecida en condiciones normales de operación

Presión fuera de rango. Se define como aquella presión diferente a la establecida en condiciones normales de operación.

Nivel fuera de rango. Se define como aquél nivel diferente al establecido en condiciones normales de operación.

- a) Si la **temperatura de la alberca de supresión** cambia, entonces es posible que se **produzcan directamente cambios** en la **presión de la contención primaria**, esto significa que se establece una relación positiva (+1 o simplemente 1) entre la temperatura de la alberca de supresión (TAS) y la presión de la contención primaria (PCP).
- b) Si la **temperatura del pozo seco** cambia, entonces es posible que se **produzcan directamente cambios** en la **presión de la contención primaria**, es decir, se establece una relación de causalidad positiva (1) entre la temperatura del pozo seco (TPS) y la presión de la contención primaria (PCP). Aquí se establece una relación positiva (1) implícita entre TAS y TPS debido a la relación que ambos guardan respecto a PCP.
- c) Si el **nivel de agua de la alberca de supresión** cambia, entonces es posible que se produzcan **directamente cambios** en la **presión del pozo** y por ende en la **temperatura del pozo**. Considerando que existe relación entre TPS y la PCP se establece entonces una relación negativa (-1) implícita entre el nivel de agua de la alberca de supresión adecuado (NAS) y la presión de la contención primaria (PCP) por la relación que ambos guardan con respecto a TPS.
- d) Si la **presión en la vasija** está **oscilando**, entonces el **nivel de agua en la vasija del reactor no** puede ser **estabilizado** y mantenido dentro de una banda especificada; esto significa que entre el nivel de agua en la vasija del reactor (NAV) y la presión en la vasija fuera del rango aceptable (PV) existe una relación de causalidad negativa (-1).
- e) Si la **potencia del reactor** está **variando**, entonces la **presión en la vasija no** puede ser **estabilizada** ni controlada adecuadamente, es decir, se establece una relación de causalidad negativa (-1) entre la presión en la vasija (PV) y la potencia del reactor (PR). Otra relación implícita que se establece es la causalidad negativa (-1) entre PR y NAV debido a que un mayor nivel de agua en la vasija (NAV) implica una disminución en la potencia del reactor (PR).
- f) Controlar el **nivel de agua en la vasija** establece el **adecuado enfriamiento del núcleo** manteniendo el núcleo sumergido. Esto significa que existe una relación de causalidad negativa (-1) entre el nivel de agua en la vasija fuera del rango aceptable (NAV) y el reactor en buen estado (RB) pues no se estaría garantizando un adecuado enfriamiento del núcleo.
- g) Las acciones para el control de la **presión en la vasija** estabilizan la presión ayudando a **controlar** el **nivel de agua en la vasija** y, en caso necesario, despresurizar y enfriar la vasija hasta condiciones de parada fría. Esto refuerza la relación de causalidad negativa (-1) entre la presión de la vasija (PV) y el nivel de agua en la vasija (NAV), además permite establecer otra relación de causalidad implícita entre PV y RB del tipo negativa (-1).
- h) Controlar la **temperatura de la alberca de supresión** utilizando los sistemas disponibles de enfriamiento de la alberca de supresión implica una acción inicial tomada para controlar el **nivel de agua de la alberca de supresión**. Esto significa que entre una temperatura de la alberca de supresión (TAS) y el nivel de agua de la alberca de supresión (NAS) se establece una relación de causalidad negativa (-1).
- i) Controlar cualquiera de los **parámetros clave de la contención primaria (temperatura de la alberca de supresión, temperatura del pozo seco y el nivel de la alberca de supresión)** pueden afectar directamente el control del resto de los parámetros de la contención primaria. De lo anterior se establecen tres relaciones implícitas; una por cada parámetro:
- Entre la temperatura de la alberca de supresión (TAS) y la contención primaria estabilizada (CPE).

- Otra entre la temperatura del pozo seco (TPS) y la contención primaria estabilizada (CPE).
- Existe una tercera entre el nivel de agua de la alberca (NAS) y la contención primaria estabilizada (CPE).

Las tres relaciones son de causalidad negativa (-1). Derivadas de estas relaciones se establece otra más, una de causalidad negativa (-1) entre la contención primaria estabilizada (CPE) y la presión de la contención primaria (PCP).

- j) Un **nivel de agua de la vasija** adecuado tiene efecto sobre la **presión del pozo** y por ende lo tiene sobre la **temperatura del pozo**. Por ello se establece una relación negativa (-1) entre el nivel de agua de la vasija (NAV) y la temperatura del pozo (TPS).
- k) La **temperatura de la alberca de supresión** es clave para una **contención estabilizada** y con ello un **reactor en buen estado**, además el buen estado del reactor influye en la **potencia** del mismo por ello se establece:
- Primero, una relación de causalidad positiva (1) entre la contención primaria estabilizada (CPE) y el reactor en buen estado (RB).
 - Después se establece otra relación de causalidad positiva (1) entre la potencia del reactor (PR) y el reactor en buen estado (RB).
 - Además se establece una relación implícita entre la temperatura de la alberca de supresión (TAS) y la potencia del reactor (PR), sólo que dicha relación es de causalidad negativa (-1).

Las relaciones se encuentran resumidas en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Relaciones encontradas en las acciones de las GPE

Acciones	Relaciones de causalidad	Valor
a)	1) Positiva entre TAS y PCP	1
	2) Positiva entre TPS y PCP	1
b)	3) Implícita positiva entre TAS y TPS debido a la relación que ambos guardan respecto a PCP	1
c)	4) Implícita negativa entre NAS y PCP derivada de 2)	-1
d)	5) Negativa entre NAV y PV	-1
	6) Negativa entre PV y PR	-1
e)	7) Implícita negativa entre PR y NAV debido a que un mayor nivel de agua en la vasija (NAV) implica una disminución en PR	-1
f)	8) Negativa entre NAV y RB pues no se estaría garantizando un adecuado enfriamiento del núcleo	-1
g)	9) Implícita negativa entre PV y RB	-1
h)	10) Negativa entre TAS y NAS	-1
	11) Negativa entre TAS y CPE	-1
i)	12) Negativa entre TPS y CPE	-1
	13) Negativa entre NAS y CPE	-1
	14) Negativa entre CPE y PCP, derivada de 10), 11) y 12)	-1
j)	15) Negativa entre NAV y TPS	-1
	16) Positiva entre CPE y RB	1
k)	17) Positiva entre PR y RB	1
	18) Implícita negativa entre TAS y PR	-1

Relaciones entre los nodos del análisis del sistema HPCS

Del modelo mental representado por la Figura 5.4, y de los diagramas conceptual y conductual representados por las Figuras 5.6 y 5.7 respectivamente, se obtienen las relaciones entre los nodos de la Tabla 5.6. Las cuales se describen a continuación.

A1 (Falla de la válvula del reactor)

- Una vez que se presenta el evento A1, no importa lo que sucede con A2 o M, debido a que se trata de una falla de primer orden, lo que implica que el sistema quede afectado de forma global. En este caso la relación que se da con respecto a las fallas antes mencionadas (A2 o M) es excluyente (-1), es decir, una vez que el sistema falla, el efecto de cualquiera de las fallas A2 o M no contribuyen a la falla del sistema, quedan excluidas.
- Con respecto al evento B éste es independiente (0). En este caso el que A1 esté presente no afecta a B.
- Con respecto al funcionamiento del sistema HPCS, éste está relacionado de forma inversamente proporcional (-1) con el evento A1.
- La relación entre A1 y el evento de que la vasija esté en buen estado, es inversamente proporcional (-1).

A2 (Falla de la válvula del tanque)

- El hecho de que el evento A2 se presente, no tiene efecto positivo o negativo sobre M. (0)
- El hecho de percibir A2 implica que no hay falla de primer orden, pues de haberla, el efecto del evento A2 no tendría importancia al quedar excluido. Por lo anterior la relación con respecto a los eventos A1 y B es excluyente (-1).
- La relación del evento A2 con respecto a que el sistema HPCS funcione, tiene una posibilidad de (-0.5), aunque no es determinante, porque aún cuando se presentara el evento A2, el sistema HPCS podría seguir funcionando siempre y cuando los eventos M, A1 y B no estén presentes.
- Con respecto a la vasija el efecto puede ser negativo si A2 se combina con el evento M, pero podría ser positivo si el evento M no se presenta, por ello el efecto resultante sería indiferente (0).

M (Falla de la válvula manual de la alberca)

- El hecho de que se presente el evento M, no tiene efecto positivo, ni negativo sobre A2 (0).
- El hecho de percibir el evento M implica que no existe falla de primer orden, pues de haberla, el efecto de M ya no tendría importancia al quedar excluido. Por lo anterior la relación con respecto a A1 y B es excluyente (-1).
- Existe una relación entre el evento M y el funcionamiento del sistema HPCS, aunque no es determinante (-0.5), porque aún cuando se presentara el evento M, el sistema HPCS podría seguir funcionando si no se presenta el evento A2; lo que implica que A1 y B tampoco están presentes.
- El efecto de la falla M con respecto al buen estado de la vasija puede ser negativo si el evento M se combina con el evento A2, y es positivo si no se presenta el evento M, por ello el efecto total sería indiferente (0).

B (Falla de la Bomba)

- El evento B es independiente del evento A1 (0), lo que implica que puede presentarse o no el evento A1, aún si se presentara no tendría ninguna influencia, debido a que el sistema HPCS ya habría fallado al presentarse el evento B.
- La relación entre el evento B con respecto a las fallas A2 y M es excluyente (-1), esto es, una vez que se presenta el evento B el efecto de los eventos A2 y

M ya no contribuyen al efecto total del sistema debido a que de forma automática el sistema HPCS queda fuera de funcionamiento.

- La relación del evento B con respecto al funcionamiento del sistema HPCS, es inversamente proporcional (-1).
- La relación del evento B con respecto al evento de que la vasija esté en buen estado, es inversamente proporcional (-1).

Quando funciona HPCS

- La relación de este elemento con respecto a cualquiera de los eventos de falla es inversamente proporcional (-1).
- Con respecto a su relación con la vasija, ésta es directamente proporcional (1), debido a que el buen funcionamiento del sistema HPCS, implica que la vasija está en buen estado.

Quando funciona la vasija

- La relación de este elemento con respecto a cualquiera de los eventos de falla es inversamente proporcional (-1).
- Con respecto a su relación con el funcionamiento de HPCS, ésta es directamente proporcional (1) porque si la vasija funciona, entonces significa que el sistema HPCS funciona.

En la Tabla 5.9 se resumen las relaciones entre los nodos del modelo.

Tabla 5.9 Relaciones de causalidad entre los nodos del sistema HPCS

Nodo	Relaciones de causalidad	Valor
A1	1) Negativa sobre A2 y B	-1
	2) Negativa sobre HPCS	-0.5
M	3) Negativa sobre A1 y B	-1
	4) Negativa sobre HPCS	-0.5
B	5) Negativa sobre A2, M, HPCS y Vasija	-1
HPCS	6) Negativa sobre A1, A2, M, B	-1
	7) Positiva sobre Vasija	1
Vasija	8) Negativa sobre A1, A2, M y B	-1
	9) Positiva sobre HPCS	1

Relaciones entre los nodos del escenario LOCA pequeño

La propuesta asocia a cada posible evento una posibilidad, que permite tomar una decisión, con base en el estado de los parámetros que formen parte de los distintos eventos iniciadores, esto es, las posibles trayectorias generadas dentro del escenario LOCA Pequeño. Del modelo mental representado por las Figuras 5.5 a) y 5.5 b), y de los grafos conceptual y conductual de las Figuras 5.6 y 5.7 respectivamente, se obtienen las siguientes relaciones entre los nodos del escenario LOCA pequeño mostrados en la Tabla 5.7. Estas relaciones se describen a continuación:

- Las **válvulas P y 01** conjuntamente con los sistemas de alta presión (**HPCS o RCIC**) propician el **éxito en la mitigación**. **RCIC solo entra cuando HPCS falla**. Lo anterior significa la presencia de las siguientes relaciones de causalidad :
 - *Positivas* entre: NB y HPCS; 01 y P; 01 y NB-VN; HPCS y NB-FL; P y NB-VN
 - *Negativas* entre: RCIC y HPCS; NB y VN; HPCS y VN; VN y NB; y VN y HPCS.

- Por su parte, la **no disponibilidad** de los sistemas de alta presión **HPCS causa la entrada de RCIC y el despresurizador X1**, y una vez que la presión haya bajado, entran inmediatamente los sistemas a baja presión **V y el sistema removedor de calor W. Lo anterior origina el éxito en la mitigación.** Lo anterior implica el establecimiento de las siguientes relaciones de causalidad:
 - *Positiva* entre: X1 y V; W y NB; V y X1; NB y W; X1 y NB-VN; V y NB-FL
 - *Negativa* entre: X1 y HPCS; V y HPCS; V y VN; W y VT-VN; HPCS y RCIC; HPCS y X1; HPCS y V; VT-FL y W
- La **no disponibilidad** del sistema removedor de calor **W, origina el funcionamiento del despresurizador X1**, para enseguida entrar en acción los sistemas a baja presión **V conjuntamente con la operación de venteo Y.** Con ello es posible que el **núcleo quede en buen estado con una contención venteadada.** Lo anterior origina las siguientes relaciones de causalidad:
 - *Positiva* entre: Y y VT
 - *Negativa* entre: Y y W; VT y W; W y SUR; SUR y W; W y VT-VN
- La situación más crítica es cuando el **despresurizador X1 o los sistemas a baja presión V fallan**, porque una falla de cualquiera de los dos, **origina el daño en el núcleo y la vulnerabilidad de la contención.** Lo anterior implica el establecimiento de las siguientes relaciones de causalidad:
 - *Negativa* entre: VN y X1; VN y V; VN y NB-VL.
- Por otro lado, el que los sistemas **permanezcan operando a pesar de la emergencia, origina el buen estado del núcleo.** Si estos **sistemas no sobreviven**, automáticamente provocarían el **daño en el núcleo, y la contención podría estar venteadada, fugada, fallada o incluso vulnerable.** De lo anterior se establecen las siguientes relaciones de causalidad:
 - *Positiva* entre: SUR y NB; y NB y SUR.
 - *Negativa* entre: SUR y VN
- El proceso de **ventilación Y** genera automáticamente una **contención venteadada.** Esto origina las siguientes relaciones de causalidad:
 - *Positiva* entre: Y y VT; y VT y Y
 - *Negativa* entre: Y y VN
- Una **falla en la ventilación Y** de la contención **origina un proceso de fuga R**, causando una **contención denominada fugada.** Lo anterior significa el establecimiento de las siguientes relaciones de causalidad:
 - *Positiva* entre: R y FG; FG y R
 - *Negativa* entre: R y Y; R y VT; R y W; R y VN; FG y VT; y FG y Y; FG y VN; Y y R; Y y FG; Y y FL; VT y R; VT y FG; VT y FL
- Una **falla del proceso de fuga R** genera una **contención fallada.** Originando la siguiente relación de causalidad:
 - *Negativa* entre: FL y R; FL y FG; y FL y VT; FL y Y; FL y VN; R y FL
- Una **falla en la válvula manual 01 provoca** que entre en **acción inmediata el sistema removedor de calor W.** La **operación de W garantiza siempre un núcleo y contención en buen estado.**
 - *Positiva* entre: W y NB
 - *Negativa* entre: W y VT; W y FG; W y FL; y W y VN.
- Una **falla en la válvula de alivio P causa** que entre en acción **el supresor de vapor SV en conjunción con el sistema removedor de calor**, con esta acción conjunta **aumenta la posibilidad de lograr una mitigación exitosa.**
 - *Positiva* entre: SV y NB-VN
 - *Negativa* entre: SV y P; SV y 01; P y SV; y 01 y SV

- El sistema removedor de calor **W entra en acción siempre que haya bajado la presión del reactor**, de manera que antes de operar, cualquiera de los que operan a alta presión (**HPCS, RCIC o X1**) **deben de estar funcionando**.

Las relaciones establecidas tienen su base en la Tabla 5.10

Tabla 5.10. Tabla de efectos entre elementos del escenario LOCA pequeño.

P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V1234	W123	X1	V1234	Y	R	SUR	NUCLEO	CONTENCIÓN
P	01		HPCS										BIEN	BIEN
P	01		-HPCS	RCIC									BIEN	BIEN
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	W123						BIEN	BIEN
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			Y		SUR	BIEN	VENTEADA
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			Y		-SUR	DANADO	VENTEADA
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	R	SUR	BIEN	FUGADA
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	R	-SUR	DANADO	FUGADA
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	-R	SUR	BIEN	FALLADA
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	-R	-SUR	DANADO	FALLADA
P	01		-HPCS	-RCIC	X1	-V1234							DANADO	VULNERABLE
P	01		-HPCS	-RCIC	-X1								DANADO	VULNERABLE
P	-01		HPCS				W123						BIEN	BIEN
P	-01		HPCS				-W123			Y		SUR	BIEN	VENTEADA
P	-01		HPCS				-W123			Y		-SUR	DANADO	VENTEADA
P	-01		HPCS				-W123			-Y	R	SUR	BIEN	FUGADA
P	-01		HPCS				-W123			-Y	R	-SUR	DANADO	FUGADA
P	-01		HPCS				-W123			-Y	-R	SUR	BIEN	FALLADA
P	-01		HPCS				-W123			-Y	-R	-SUR	DANADO	FALLADA
P	-01		-HPCS	RCIC			W123						BIEN	BIEN
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	V1234	Y		SUR	BIEN	VENTEADA
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	V1234	Y		-SUR	DANADO	VENTEADA
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	V1234	-Y	R	SUR	BIEN	FUGADA
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	V1234	-Y	R	-SUR	DANADO	FUGADA
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	V1234	-Y	-R	SUR	BIEN	FALLADA
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	V1234	-Y	-R	-SUR	DANADO	FALLADA
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	-V1234				DANADO	VULNERABLE
P	-01		-HPCS	RCIC			-W123	X1	-V1234				DANADO	VULNERABLE
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	W123						BIEN	BIEN
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			Y		SUR	BIEN	VENTEADA
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			Y		-SUR	DANADO	VENTEADA
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	R	SUR	BIEN	FUGADA
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	R	-SUR	DANADO	FUGADA
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	-R	SUR	BIEN	FALLADA
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W123			-Y	-R	-SUR	DANADO	FALLADA
P	-01		-HPCS	-RCIC	X1	-V1234							DANADO	VULNERABLE
P	-01		-HPCS	-RCIC	-X1								DANADO	VULNERABLE
-P		SV	HPCS				W13						BIEN	BIEN
-P		SV	HPCS				-W13			Y		SUR	BIEN	VENTEADA
-P		SV	HPCS				-W13			Y		-SUR	DANADO	VENTEADA
-P		SV	HPCS				-W13			-Y	R	SUR	BIEN	FUGADA
-P		SV	HPCS				-W13			-Y	R	-SUR	DANADO	FUGADA
-P		SV	HPCS				-W13			-Y	-R	SUR	BIEN	FALLADA
-P		SV	HPCS				-W13			-Y	-R	-SUR	DANADO	FALLADA
-P		SV	-HPCS	RCIC			W13						BIEN	BIEN
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	V1234	Y		SUR	BIEN	VENTEADA
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	V1234	Y		-SUR	DANADO	VENTEADA
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	V1234	-Y	R	SUR	BIEN	FUGADA
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	V1234	-Y	R	-SUR	DANADO	FUGADA
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	V1234	-Y	-R	SUR	BIEN	FALLADA
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	V1234	-Y	-R	-SUR	DANADO	FALLADA
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	-V1234				DANADO	VULNERABLE
-P		SV	-HPCS	RCIC			-W13	X1	-V1234				DANADO	VULNERABLE
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	V1234	W13						BIEN	BIEN
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W13			Y		SUR	BIEN	VENTEADA
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W13			Y		-SUR	DANADO	VENTEADA
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W13			-Y	R	SUR	BIEN	FUGADA
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W13			-Y	R	-SUR	DANADO	FUGADA
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W13			-Y	-R	SUR	BIEN	FALLADA
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	V1234	-W13			-Y	-R	-SUR	DANADO	FALLADA
-P		SV	-HPCS	-RCIC	X1	-V1234							DANADO	VULNERABLE
-P		SV	-HPCS	-RCIC	-X1								DANADO	VULNERABLE

Notas:

- Contención Bien (CB) está implícito cuando VT, FG, FL y VN están ausentes.
- V1234 = V y significa que está presente V1 ó V2 ó V3 ó V4
- W123 = W y significa que está presente W1 ó W2 ó W3
- W13 = Significa W1 ó W3 si W1 falla.

La Tabla 5.10 y la descripción de las relaciones positivas y negativas dieron origen a las Tablas 5.11 y 5.12

Tabla 5.11 Relaciones encontradas a partir de la Tabla de efectos 5.10

Relaciones
P requiere HPCS
HPCS requiere de 01 o W para causar NB y CB
SV se debe a -P y -01
SV requiere de HPCS y W
RCIC se debe a -HPCS
-RCIC origina la presencia de X1, V y W
-W necesita que exista Y
Y origina VT y se debe a -W
R origina FG y se debe a -Y
SUR causa NB
NB se debe a W, P, HPCS, 01
W origina NB
-R causa FL y se debe a -Y
FL se debe a -R, -Y
-SUR origina -NB
VN origina -NB, y se debe a -V, -X1, -HPCS
-01 origina HPCS, W
SV, RCIC, -W originan X1, V

Tabla 5.12 Relaciones de causalidad entre los nodos del escenario LOCA pequeño

Nodo	Relaciones de causalidad	Valor
P	1) Negativa sobre SV	-1
	2) Positivas sobre NB-VN	0.33
	3) Positiva sobre P	1
01	4) Negativa sobre SV	-1
	5) Positivas sobre NB-VN	0.66
SV	6) Negativa sobre P, 01	-1
	7) Positiva sobre NB-VN	0.33
HPCS	8) Negativa sobre RCIC, X1, V, VN	-1
	9) Positiva sobre NB-FL	0.66
RCIC	10) Negativa sobre HPCS	-1
	11) Negativa sobre HPCS	-1
X1	12) Positiva sobre V	1
	13) Positiva sobre NB-VN	0.66
	14) Negativa sobre HPCS, VN	-1
V	15) Positiva sobre X1	1
	16) Positiva sobre NB-FL	0.66
W	17) Positiva sobre NB	1
	18) Negativa sobre SUR, VT-VN	-1
Y	19) Negativa sobre W, R, FG, FL, VN	-1
	20) Positiva sobre VT	1
R	21) Negativa sobre W, Y, VT, FL, VN	-1
	22) Positiva sobre FG	1
SUR	23) Negativa sobre W, VN	-1
	24) Positiva sobre NB	1
NB	25) Negativa sobre VN	-1
	26) Positiva sobre HPCS, W, SUR	1
VT	27) Negativa sobre W, R, FG, FL, VN	-1
	28) Positiva sobre Y	1
FG	29) Negativa sobre W, Y, VT, FL, VN	-1
	30) Positiva sobre R	1
FL	31) Negativa sobre W, Y, R, VT, FG, VN	-1
VN	32) Negativa sobre HPCS, X1, V, NB, VT, FG, FL	-1

5.6.4 Mapa cognoscitivo difuso y matriz de relaciones

En esta sección se presenta el desarrollo del mapa cognoscitivo en función de las relaciones establecidas en la *sección previa* 5.3.3.

Mapa cognoscitivo difuso (MCD)

El MCD constituye el diagrama con los nodos identificados y las aristas son las flechas que ilustran las relaciones de causalidad establecidas entre ellos. La relación de causalidad neutra o cero no es dibujada en el diagrama, únicamente se representan las causalidades negativas o positivas mediante las aristas cuyos valores (peso de interconexión) están dentro del rango $[-1,0)$ y $(0,1]$, respectivamente. Los nodos toman valores en el intervalo $[0,1]$, es decir **indican el valor del estado en que se encuentran los conceptos que están representando dichos nodos.**

Matriz de causalidad

La representación del MCD es una matriz con los valores de causalidad positiva o negativa entre cada uno de los nodos y el resto de ellos que se obtuvieron del análisis realizado con la asesoría del experto en el dominio y el ACT. La matriz puede construirse sin considerar un orden específico y el resultado del análisis no es afectado.

MCD y matriz de causalidad del análisis de parámetros

El mapa cognoscitivo difuso se aprecia en la Figura 5.11

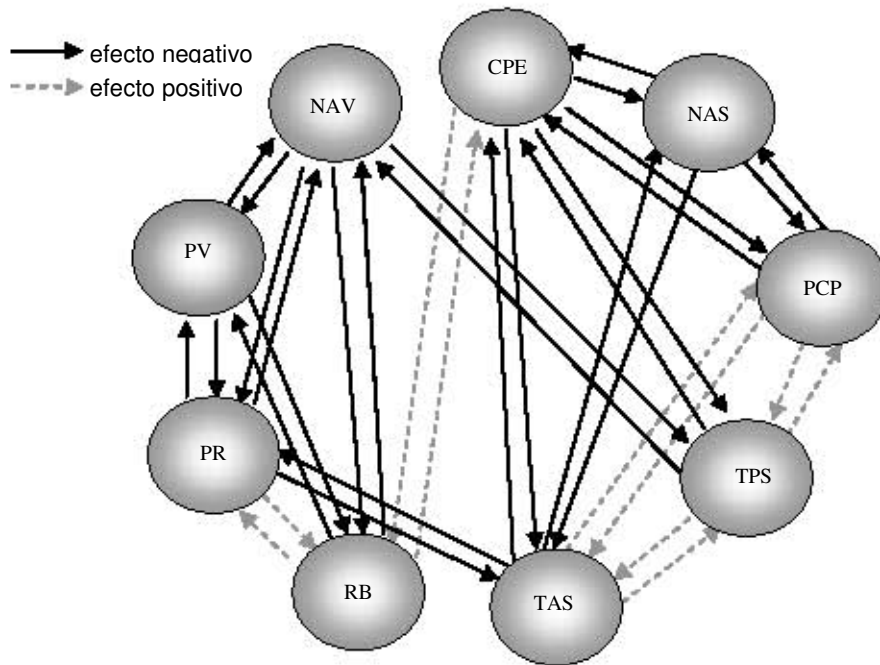


Fig. 5.11. MCD del análisis de parámetros

Tabla 5.13. Matriz de relaciones de causalidad de las acciones de la GPE

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
NAV	0	-1	-1	0	-1	0	0	-1	0
PV	-1	0	-1	0	0	0	0	-1	0
PR	-1	-1	0	-1	0	0	0	1	0
TAS	0	0	-1	0	1	1	-1	0	-1
TPS	-1	0	0	1	0	1	0	0	-1
PCP	0	0	0	1	1	0	-1	0	-1
NAS	0	0	0	-1	0	-1	0	0	-1
RB	1	-1	1	0	0	0	0	0	1
CPE	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	0

MCD y matriz de relaciones de causalidad del sistema HPCS

El MCD y las relaciones de causalidad establecidas entre los diferentes nodos se aprecian en la Figura 5.12 y la Tabla 5.14 respectivamente.

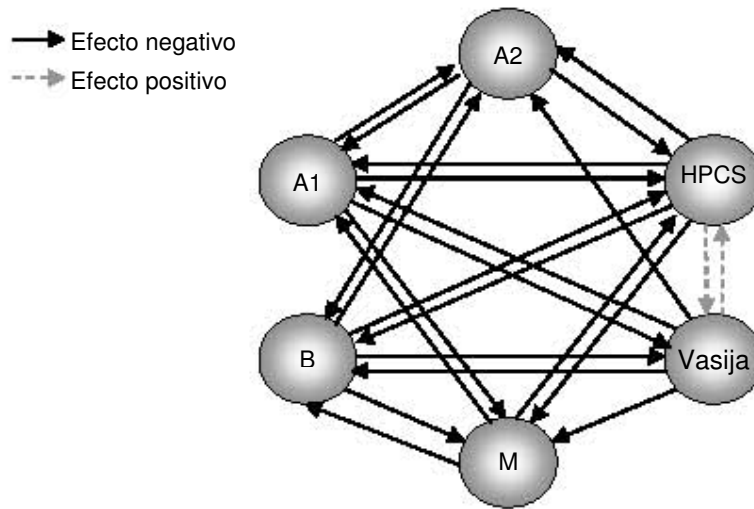


Fig. 5.12 Mapa Cognoscitivo Difuso de un conjunto representativo del escenario LOCA pequeño.

Tabla 5.14. Matriz de relaciones de causalidad en el sistema HPCS

	A1	A2	M	B	HPCS	Vasija
A1	0.000000	-1.000000	-1.000000	0.000000	-1.000000	-1.000000
A2	-1.000000	0.000000	0.000000	-1.000000	-0.500000	0.000000
M	-1.000000	0.000000	0.000000	-1.000000	-0.500000	0.000000
B	0.000000	-1.000000	-1.000000	0.000000	-1.000000	-1.000000
HPCS	-1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000	0.000000	1.000000
Vasija	-1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000	0.000000

MCD y matriz de relaciones de causalidad del escenario LOCA pequeño

El MCD se muestra en la Figura 5.13 y su correspondiente matriz de la relaciones en la Tabla 5.15.

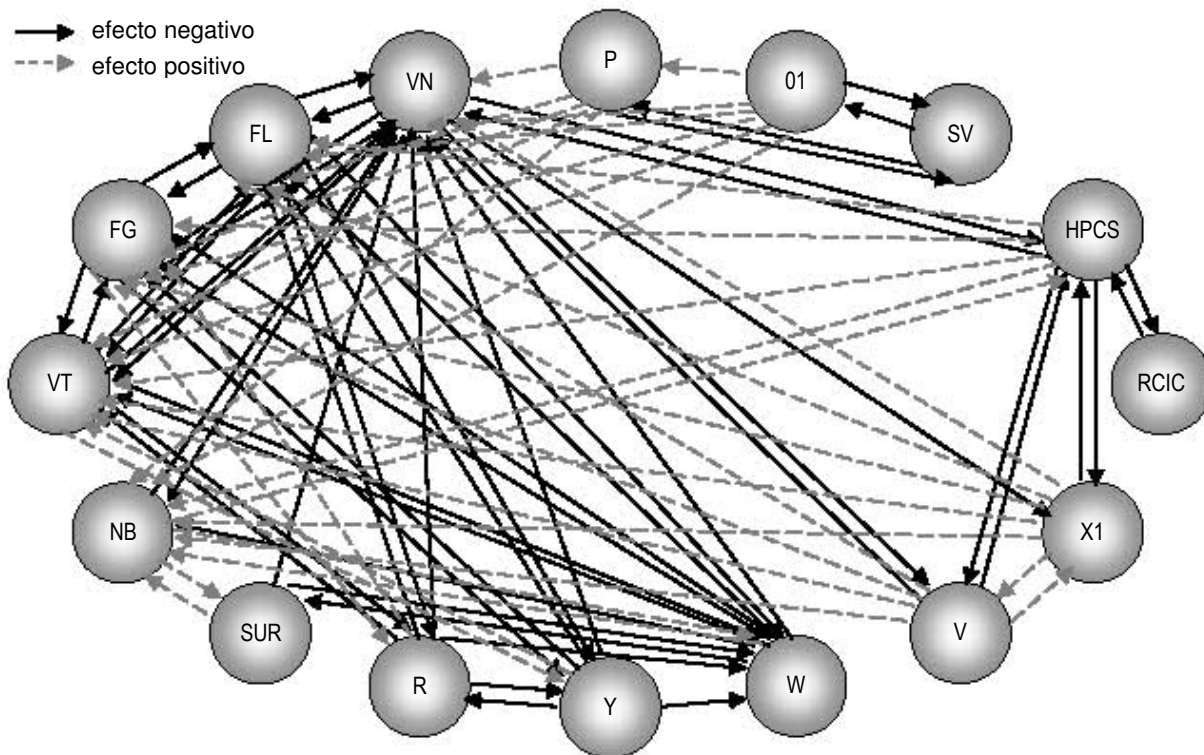


Fig. 5.13. MCD del escenario LOCA pequeño

Tabla 5.15. Matriz de relaciones de causalidad bajo el escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
P	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
01	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
SV	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
HPCS	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0.66	0.66	0.66	0.66	-1
RCIC	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
V	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0.66	0.66	0.66	0.66	-1
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	-1	-1	-1
Y	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	1	-1	-1	-1
R	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	-1	1	-1	-1
SUR	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	-1
NB	0	0	0	0.33	0	0	0	0.33	0	0	0.33	0	0	0	0	-1
VT	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	-1	-1	-1
FG	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	-1	0	-1	-1
FL	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	0	-1
VN	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0

5.6.5 SIMULACIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación detallamos las pruebas que se desarrollaron con los MCDs de las Figuras 5.11 5.12 y 5.13 y cuya matriz de relaciones de causalidad son las representadas por las Tablas 5.13, 5.14 y 5.15, respectivamente.

En cada uno de los escenarios de prueba se tiene un vector inicial (estado de los nodos que constituyen el MCD), los vectores resultantes de las iteraciones indicadas ($V_1 - V_8$ en promedio) y un vector final; cuyo valor constituye el estado de cada uno de los nodos en un escenario futuro. Para la interpretación de los resultados, se realiza un redondeo de acuerdo al siguiente criterio:

$$S(x) \leq 0.337, \text{ equivalen a } 0.$$

$$0.455 \leq S(x) \leq 0.55, \text{ equivalen a } 0.5$$

$$S(x) \geq 0.79, \text{ equivalen a } 1$$

donde:

0 , la característica del proceso representada por el nodo es nula,

0.5 , la característica del proceso representada por el nodo está presente en un 50%

1 , la característica del proceso representada por el nodo está presente en un 100%,

Escenarios de prueba de análisis de parámetros

Prueba 1

Primer Escenario. Se indica el valor inicial de cada uno de los nodos, en este caso el nodo TAS (Temperatura de la Alberca de Supresión fuera del rango aceptable) es el único con valor 1, el resto de los nodos valen cero.

Vector inicial	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V_1	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Tabla 5.16. Resultados de la prueba 1 del análisis de parámetros

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V_1	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V_2	0.500000	0.500000	0.006693	0.500000	0.993307	0.993307	0.006693	0.500000	0.006693
V_3	0.000045	0.006474	0.006693	0.999946	0.992847	0.999389	0.000553	0.007153	0.000047
V_4	0.006269	0.482643	0.006716	0.999951	0.999954	0.999953	0.000046	0.500275	0.000000
V_5	0.000048	0.071339	0.007083	0.999953	0.999953	0.999955	0.000045	0.082339	0.000004
V_6	0.003008	0.389991	0.007069	0.999953	0.999955	0.999955	0.000045	0.420310	0.000000
V_7	0.000113	0.104151	0.007666	0.999953	0.999954	0.999955	0.000045	0.126790	0.000003
V_8	0.002040	0.337860	0.007487	0.999953	0.999955	0.999955	0.000045	0.381550	0.000001
V_9	0.000178	0.123968	0.008232	0.999953	0.999954	0.999955	0.000045	0.159485	0.000002
V_{10}	0.001565	0.301646	0.007978	0.999953	0.999955	0.999955	0.000045	0.359034	0.000001
V_{11}	0.000238	0.136710	0.008831	0.999953	0.999954	0.999955	0.000045	0.186008	0.000002
V_{12}	0.001283	0.273809	0.008540	0.999953	0.999955	0.999955	0.000045	0.345116	0.000001
V_f	0.000292	0.144960	0.009474	0.999953	0.999954	0.999955	0.000045	0.208704	0.000002

Aplicando Los criterios de redondeo se obtiene el siguiente vector final (V_f):

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V_f	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Los valores 0 y 1 se interpretan como la nulidad y el 100% respectivamente de la característica del proceso que el nodo, en particular, representa.

Este es un escenario donde los nodos TAS (Temperatura de la alberca de supresión), TPS (Temperatura de pozo seco) y PCP (Presión de la contención primaria) toman el valor 1; mientras que el resto de ellos toman el valor 0, incluyendo los nodos RB (Reactor en Buen estado) y CPE (Contención Primaria Estabilizada). Lo anterior significa que al presentarse la temperatura del pozo seco fuera de rango origina una presión fuera de rango en la contención primaria, lo que trae como consecuencia la desestabilización de la contención primaria, lo mismo que la falla del reactor.

Prueba 2

Segundo escenario. Inicialmente, el nodo TPS (Temperatura del Pozo Seco fuera del rango aceptable) es el único con valor 1 mientras el resto de los nodos tienen valor 0.

Vector inicial	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Tabla 5.17 Resultados de la prueba 2 del análisis de parámetros

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V ₂	0.006693	0.500000	0.500000	0.993307	0.500000	0.993307	0.500000	0.500000	0.006693
V ₃	0.000045	0.006474	0.006693	0.919315	0.999948	0.992847	0.000047	0.500000	0.000004
V _f	0.000518	0.073530	0.106294	0.999951	0.999930	0.999932	0.000070	0.500222	0.000006

Aplicando Los criterios de redondeo se obtiene el siguiente vector final (V_f):

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V _f	0	0	0	1	1	1	0	0.5	0

Los valores 0 y 1 se interpretan como la nulidad y el 100% respectivamente de la característica del proceso que el nodo, en particular, representa.

Este es un escenario donde los nodos TAS (Temperatura de la alberca de supresión), TPS (Temperatura de pozo seco) y PCP (Presión de la contención primaria) toman el valor 1; mientras que el resto de ellos toman el valor 0, incluyendo a CPE (Contención Primaria Estabilizada), con excepción de RB que muestra un valor que no puede redondearse como 0 ó 1, de acuerdo al criterio establecido anteriormente, sino que se encuentra justo en medio.

Lo anterior significa que la temperatura fuera del rango aceptable del pozo seco tiene como efecto inmediato la presión fuera de rango de la contención primaria así como una temperatura fuera de rango de la alberca de supresión. Debido a estos efectos, se presenta la desestabilización de la contención primaria y el reactor (RB) se vuelve vulnerable pues su estado no se encuentra en un 100% de la propiedad “Bien” del Reactor.

Prueba 3

Tercer escenario: El nodo NAS (Nivel de Agua de la Alberca de Supresión fuera del rango aceptable) inicialmente tiene valor 1, mientras el resto de los nodos tienen valor 0.

Vector inicial	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Tabla 5.18 Resultados de la prueba 3 del análisis de parámetros

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
V ₂	0.500000	0.500000	0.500000	0.006693	0.500000	0.006693	0.500000	0.500000	0.006693
V ₃	0.000045	0.000553	0.073545	0.075858	0.078238	0.500000	0.474923	0.078238	0.071297
V ₄	0.239966	0.318833	0.502227	0.448276	0.925709	0.123400	0.037841	0.672876	0.005200
V ₅	0.000006	0.000845	0.158292	0.925477	0.836519	0.998714	0.052931	0.436136	0.013233
V ₆	0.000777	0.048699	0.079368	0.999682	0.999929	0.999792	0.000062	0.701274	0.000007
V ₇	0.000107	0.019703	0.149386	0.999932	0.999954	0.999954	0.000046	0.537304	0.000010
V _f	0.000197	0.031250	0.082248	0.999904	0.999955	0.999955	0.000045	0.656545	0.000004

Aplicando Los criterios de redondeo se obtiene el siguiente vector final (V_f):

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V _f	0	0	0	1	1	1	0	0.6	0

Los valores 0 y 1 se interpretan como la nulidad y el 100% respectivamente de la característica del proceso que el nodo, en particular, representa.

Siendo que el NAS (nivel del agua de la alberca de supresión) tiene un efecto inmediato en la presión del pozo seco, lo cual repercute directamente en la temperatura del mismo. Debido a lo anterior se presenta una presión fuera de rango en la contención primaria, lo que trae como consecuencia la desestabilización de la contención primaria y cierta vulnerabilidad del reactor. Teniendo cierta recuperación con respecto al escenario anterior.

Prueba 4

Cuarto escenario. El nodo PR (Potencia del Reactor fuera del rango aceptable), inicialmente tiene valor 1, mientras el resto de los nodos tienen valor 0.

Vector inicial	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.19. Resultados de la prueba 4 del análisis de parámetros

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V ₂	0.006693	0.006693	0.500000	0.006693	0.500000	0.500000	0.500000	0.993307	0.500000
V ₃	0.000045	0.000553	0.992356	0.075858	0.500000	0.078238	0.006474	0.992847	0.071297
V ₄	0.000004	0.000049	0.989869	0.078750	0.601990	0.923468	0.244721	0.995108	0.840424
V ₅	0.000002	0.000049	0.989865	0.060212	0.691887	0.116910	0.000100	0.999894	0.013801
V ₆	0.000002	0.000048	0.990970	0.273916	0.693513	0.975660	0.277957	0.993426	0.657895
V ₇	0.000002	0.000049	0.973333	0.216150	0.950659	0.539389	0.000072	0.999737	0.002154
V ₈	0.000000	0.000052	0.980501	0.929067	0.977399	0.997050	0.022129	0.992439	0.028397
V ₉	0.000000	0.000052	0.578495	0.991138	0.999924	0.999907	0.000057	0.993595	0.000063
V _f	0.000003	0.000386	0.503005	0.999181	0.999953	0.999952	0.000047	0.947476	0.000046

Aplicando Los criterios de redondeo se obtiene el siguiente vector final (V_f):

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V _f	0	0	0.5	1	1	1	0	1	0

Los valores 0 y 1 se interpretan como la nulidad y el 100% respectivamente de la característica del proceso que el nodo, en particular, representa.

El resultado es un escenario donde una variación en la potencia del reactor afecta a la presión de la contención primaria, sacándola del rango aceptable; de la misma manera, afecta a la temperatura del pozo seco y la alberca de supresión. Por ello surge la

desestabilización de la contención primaria. El reactor se encuentra operando en condiciones normales, aún cuando la potencia del mismo se encuentra a la mitad de su capacidad.

Prueba 5

Quinto escenario: El nodo PV (Presión de la Vasija fuera del rango aceptable) inicialmente tiene valor 1, mientras el resto de los nodos tienen valor 0.

Vector inicial	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.20. Resultados de la prueba 5 del análisis de parámetros

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V ₂	0.006693	0.500000	0.006693	0.500000	0.500000	0.500000	0.500000	0.006693	0.500000
V ₃	0.006262	0.474923	0.006693	0.491635	0.921762	0.500000	0.000553	0.500000	0.000047
V ₄	0.000074	0.071440	0.085952	0.999152	0.992801	0.999145	0.006975	0.085315	0.000850
V ₅	0.002071	0.298029	0.007198	0.999924	0.999954	0.999951	0.000046	0.519100	0.000000
V ₆	0.000109	0.066493	0.019751	0.999953	0.999954	0.999955	0.000045	0.187779	0.000004
V ₇	0.001709	0.261499	0.012202	0.999950	0.999955	0.999955	0.000045	0.441706	0.000001
V ₈	0.000188	0.092954	0.016187	0.999952	0.999954	0.999955	0.000045	0.221831	0.000003
V ₉	0.001286	0.233075	0.012663	0.999951	0.999955	0.999955	0.000045	0.404978	0.000001
V ₁₀	0.000260	0.109619	0.015571	0.999952	0.999954	0.999955	0.000045	0.248153	0.000002
V _f	0.001041	0.210831	0.013277	0.999951	0.999955	0.999955	0.000045	0.384254	0.000001

Aplicando Los criterios de redondeo se obtiene el siguiente vector final (V_f):

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V _f	0	0	0	1	1	1	0	0.38	0

Los valores 0 y 1 se interpretan como la nulidad y el 100% respectivamente de la característica del proceso que el nodo, en particular, representa.

En este caso, la presión fuera de rango en la vasija trajo como resultado el efecto sobre la temperatura del pozo seco lo mismo que de la alberca de supresión y por consiguiente una presión fuera de rango en la contención primaria, lo que trae como consecuencia la desestabilización de la contención primaria, lo mismo que una seria degradación en el funcionamiento del reactor.

Prueba 6

Sexto escenario: Inicialmente el nodo PCP (Presión de la Contención Primaria fuera del rango aceptable) tiene valor 1, mientras el resto de los nodos tienen valor 0.

Vector inicial	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 5.21. Resultados de la prueba 6 del análisis de parámetros

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V ₂	0.500000	0.500000	0.500000	0.993307	0.993307	0.500000	0.006693	0.500000	0.006693
V ₃	0.000004	0.000553	0.000572	0.992606	0.992847	0.999948	0.000553	0.078238	0.000047
V ₄	0.004674	0.402739	0.010205	0.999953	0.999953	0.999951	0.000047	0.500077	0.000000
V ₅	0.000070	0.070779	0.010598	0.999952	0.999954	0.999955	0.000045	0.120677	0.000004
V ₆	0.002448	0.341476	0.008572	0.999952	0.999955	0.999955	0.000045	0.425255	0.000001
V ₇	0.000140	0.101436	0.010020	0.999953	0.999954	0.999955	0.000045	0.157526	0.000003
V ₈	0.001753	0.301866	0.008836	0.999952	0.999955	0.999955	0.000045	0.387517	0.000001
V ₉	0.000205	0.120201	0.010148	0.999953	0.999954	0.999955	0.000045	0.186349	0.000002
V ₁₀	0.001381	0.272196	0.009285	0.999952	0.999955	0.999955	0.000045	0.365567	0.000001
V _f	0.000265	0.132255	0.010563	0.999952	0.999954	0.999955	0.000045	0.210576	0.000002

Aplicando Los criterios de redondeo se obtiene el siguiente vector final (V_f):

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V _f	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Los valores 0 y 1 se interpretan como la nulidad y el 100% respectivamente de la característica del proceso que el nodo, en particular, representa.

En este escenario, la presión fuera del rango aceptable de la contención primaria produjo un efecto negativo en la temperatura del pozo seco lo mismo que en la de la alberca de supresión y por consiguiente genera la desestabilización de la contención primaria y la falla del reactor.

Prueba 7

Séptimo escenario: Inicialmente los nodos RB (Reactor en Buen estado) y CPE (Contención Primaria Estabilizada), tienen valor 1, mientras el resto tienen valor 0.

Vector inicial	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Tabla 5.22 Resultados de la prueba 7 del análisis de parámetros

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V ₁	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000
V ₂	0.006693	0.006693	0.993307	0.006693	0.006693	0.006693	0.006693	0.993307	0.993307
V _f	0.000045	0.000047	0.992356	0.000050	0.007153	0.007153	0.006474	0.999948	0.992098

Aplicando Los criterios de redondeo se obtiene el siguiente vector final (V_f):

	NAV	PV	PR	TAS	TPS	PCP	NAS	RB	CPE
V _f	0	0	1	0	0	0	0	1	1

En este caso, la influencia de dos nodos positivos (RB- Reactor en buen estado y CPE- Contención primaria estabilizada) sobre la potencia del reactor, mantiene al reactor en buen estado mientras no se presente ningún parámetro (temperatura, presión o nivel de agua) fuera de los rangos aceptables.

Escenarios de prueba del sistema HPCS

Prueba 1

Primer escenario: Se indica la presencia del evento A1 (falla de la válvula del reactor).

Tabla 5.23. Resultados de la prueba 1 del estado del sistema HPCS

	A1	A2	M	B	HPCS	Vasija
V_i	1	0	0	0	0	0
V_1	0.500000	0.006693	0.006693	0.500000	0.006693	0.006693
V_2	0.466586	0.006262	0.006262	0.466586	0.006693	0.006919
V_3	0.467376	0.008715	0.008715	0.467376	0.009354	0.009638
V_4	0.454598	0.008420	0.008420	0.454598	0.009293	0.009689
V_5	0.455342	0.009557	0.009557	0.455342	0.010565	0.010992
V_6	0.449336	0.009367	0.009367	0.449336	0.010496	0.010980
V_7	0.449907	0.009944	0.009944	0.449907	0.011148	0.011648
V_8	0.446845	0.009824	0.009824	0.446845	0.011090	0.011620
V_9	0.447249	0.010131	0.010131	0.447249	0.011436	0.011974
V_{10}	0.445627	0.010055	0.010055	0.445627	0.011393	0.011946
V_{11}	0.445900	0.010222	0.010222	0.445900	0.011580	0.012137
V_{12}	0.445023	0.010175	0.010175	0.445023	0.011550	0.012115
V_{13}	0.445201	0.010266	0.010266	0.445201	0.011652	0.012219
V_f	0.5	0	0	0	0	0

Aplicando el redondeo, antes especificado, y tomando en consideración el significado del valor 0 y el valor de 1, también especificado al iniciar la *sección 5.6.5.*; el resultado es un escenario donde falla el sistema HPCS (representado por 0) y se presenta el mal funcionamiento de la vasija (representado por el 0).

Prueba 2

Segundo escenario: se indica la presencia del evento A2 (falla de la válvula del tanque).

Tabla 5.24. Resultados de la prueba 2 del estado del sistema HPCS

	A1	A2	M	B	HPCS	Vasija
V_i	0	1	0	0	0	0
V_1	0.006693	0.500000	0.500000	0.006693	0.075858	0.500000
V_2	0.000378	0.049915	0.049915	0.000378	0.483274	0.577462
V_3	0.003010	0.004930	0.004930	0.003010	0.933015	0.917782
V_4	0.000091	0.000093	0.000093	0.000091	0.989378	0.990387
V_5	0.000050	0.000050	0.000050	0.000050	0.992970	0.992938
V_6	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993063	0.993066
V_7	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_8	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_9	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_{10}	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_{11}	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_{12}	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_{13}	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_f	0	0	0	0	1	1

Aplicando el redondeo, antes especificado, y tomando en consideración el significado del valor 0 y el valor de 1, también especificado al iniciar el punto 5.6.5.; el resultado es un escenario donde se muestra el buen funcionamiento del sistema HPCS (representado por 1) y se presenta la vasija en buen estado (representado por el 1).

Prueba 3

Tercer escenario: se indica la presencia del evento M (falla de la válvula de la alberca).

Tabla 5.25. Resultado de la prueba 3 del estado del sistema HPCS

	A1	A2	M	B	HPCS	Vasija
V_i	0	0	1	0	0	0
V_1	0.006693	0.500000	0.500000	0.006693	0.075858	0.500000
V_2	0.000378	0.049915	0.049915	0.000378	0.483274	0.577462
V_3	0.003010	0.004930	0.004930	0.003010	0.933015	0.917782
V_4	0.000091	0.000093	0.000093	0.000091	0.989378	0.990387
V_5	0.000050	0.000050	0.000050	0.000050	0.992970	0.992938
V_6	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993063	0.993066
V_7	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_8	0.000049	0.000049	0.000049	0.000049	0.993068	0.993069
V_f	0	0	0	0	0	0

Aplicando el redondeo especificado al inicio de 5.6.5 y considerando el valor que representa 0 y el 1; el resultado es el buen funcionamiento del sistema HPCS y de la vasija indicando por el valor 1 al final de la columna correspondiente.

Prueba 4

Cuarto escenario: se indica la presencia del evento B (falla de la bomba).

Tabla 5.26. Resultados de la prueba 4 del estado del sistema HPCS

	A1	A2	M	B	HPCS	Vasija
V_i	0	0	0	1	0	0
V_1	0.500000	0.006693	0.500000	0.006693	0.006693	0.006693
V_2	0.466586	0.006693	0.006693	0.466586	0.006693	0.006919
V_3	0.467376	0.006262	0.006262	0.467376	0.009354	0.009638
V_4	0.454598	0.008715	0.008715	0.454598	0.009293	0.009689
V_5	0.455342	0.008420	0.008420	0.455342	0.010565	0.010992
V_6	0.449336	0.009557	0.009557	0.449336	0.010496	0.010980
V_7	0.449907	0.009367	0.009367	0.449907	0.011148	0.011648
V_8	0.446845	0.009944	0.009944	0.446845	0.011090	0.011620
V_9	0.447249	0.009824	0.009824	0.447249	0.011436	0.011974
V_{10}	0.445627	0.010131	0.010131	0.445627	0.011393	0.011946
V_{11}	0.445900	0.010055	0.010055	0.445900	0.011580	0.012137
V_{12}	0.445023	0.010222	0.010222	0.445023	0.011550	0.012115
V_{13}	0.445201	0.010175	0.010175	0.445201	0.011652	0.012219
V_f	0.5	0	0	0.5	0	0

Aplicando el redondeo, antes especificado, y tomando en consideración el significado del valor 0 y el valor de 1, también especificado al iniciar el punto 5.6.5.; el resultado es un escenario donde falla el sistema HPCS (representado por 0) y se presenta el mal funcionamiento de la vasija (representado por el 0).

Prueba 5

Quinto escenario: se indica la presencia del evento A2 (falla de la válvula del tanque) y M (falla de la válvula de la alberca).

Tabla 5.27. Resultados de la prueba 5 del estado del sistema HPCS

	A1	A2	M	B	HPCS	Vasija
V_i	0	1	1	0	0	0
V_1	0.000045	0.500000	0.500000	0.000045	0.000045	0.000045
V_2	0.006690	0.499830	0.499830	0.006690	0.006691	0.006691
V_3	0.006273	0.474932	0.474932	0.006273	0.006485	0.006485
V_4	0.008049	0.476229	0.476229	0.008049	0.008329	0.008329
V_5	0.007802	0.469505	0.469505	0.007802	0.008153	0.008153
V_6	0.008354	0.470339	0.470339	0.008354	0.008729	0.008729
V_7	0.008238	0.468245	0.468245	0.008238	0.008635	0.008635
V_8	0.008419	0.468652	0.468652	0.008419	0.008822	0.008822
V_f	0	0.5	0.5	0	0	0

Aplicando el redondeo, antes especificado, y tomando en consideración el significado del valor 0 y el valor de 1, también especificado al iniciar el punto 5.6.5.; el resultado es un escenario donde falla el sistema HPCS (representado por 0) y se presenta el mal funcionamiento de la vasija (representado por el 0).

Los resultados fueron comparados con el análisis del experto, teniendo congruencia en todos ellos.

Se realizaron otras pruebas como indicar “HPCS funciona” o “vasija en buen estado”, o “HPCS y Vasija funcionando”, los resultados fueron, como era de esperarse, los mismos en todos ellos: “HPCS y vasija funcionando”.

Escenarios de prueba del escenario LOCA pequeño

Dentro de Loca Pequeño, se realizó un primer análisis solo con uno de los sistemas de los que intervienen en este escenario (HPCS), obteniendo los resultados arriba mencionados.

El análisis se extendió al resto de los sistemas que intervienen dentro del escenario LOCA pequeño.

Existe un concepto implícito en los 16 nodos, éste es la “contención bien”, y está presente cuando los últimos cuatro elementos (contención venteada, fugada, fallada y vulnerable) no lo están, es decir, al no tener ningún grado de falla en la contención entonces se asume que la contención está bien.

Prueba 1

Se indica la presencia de P, 01, HPSC que corresponden a los conceptos válvula de alivio, válvula manual para disponer del condensador, y el sistema de enfriamiento a alta presión, respectivamente.

Tabla 5.28. Resultados de la prueba 1 del escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPSC	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
V[0]=	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[1]=	0.993307	0.500000	0.000045	0.500000	0.006693	0.006693	0.006693	0.500000	0.500000	0.500000	0.500000	0.999739	0.000261	0.000261	0.000261	0.000048
V[2]=	0.924126	0.499943	0.000572	0.824760	0.075858	0.078220	0.078220	0.002859	0.075767	0.075767	0.299342	0.999954	0.000561	0.000561	0.000004	0.000000
V[3]=	0.923921	0.499286	0.000808	0.619736	0.015925	0.023369	0.023369	0.352041	0.406404	0.406404	0.836939	0.999638	0.001609	0.001609	0.000753	0.000000
V[4]=	0.923606	0.498990	0.000811	0.791846	0.043162	0.048253	0.048253	0.001333	0.115497	0.115497	0.472328	0.999988	0.000788	0.000788	0.000013	0.000000
V[5]=	0.923501	0.498986	0.000814	0.721445	0.018721	0.023708	0.023708	0.133013	0.359496	0.359496	0.837986	0.999791	0.002206	0.002206	0.000694	0.000000
V[6]=	0.923499	0.498983	0.000814	0.789011	0.026411	0.029636	0.029636	0.002106	0.141736	0.141736	0.728018	0.999974	0.001678	0.001678	0.000046	0.000000
V[7]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.772335	0.018983	0.021948	0.021948	0.031539	0.329840	0.329840	0.837457	0.999934	0.002497	0.002497	0.000601	0.000000
V[8]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.791748	0.020599	0.022934	0.022934	0.002832	0.160811	0.160811	0.816408	0.999963	0.002379	0.002379	0.000087	0.000000
V[9]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.788783	0.018730	0.020958	0.020958	0.016883	0.309066	0.309066	0.836959	0.999956	0.002567	0.002567	0.000509	0.000000
V[10]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.793590	0.019004	0.021059	0.021059	0.003492	0.175393	0.175393	0.827143	0.999962	0.002441	0.002441	0.000110	0.000000
V[11]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.793200	0.018561	0.020580	0.020580	0.013862	0.293693	0.293693	0.836509	0.999958	0.002574	0.002574	0.000441	0.000000
V[12]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.794347	0.018597	0.020571	0.020571	0.004080	0.186841	0.186841	0.829293	0.999962	0.002449	0.002449	0.000129	0.000000
V[13]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.794333	0.018492	0.020455	0.020455	0.012248	0.281942	0.281942	0.836106	0.999959	0.002568	0.002568	0.000393	0.000000
V[14]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.794607	0.018494	0.020444	0.020444	0.004597	0.195970	0.195970	0.830432	0.999962	0.002463	0.002463	0.000146	0.000000
V[15]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.794624	0.018469	0.020416	0.020416	0.011126	0.272777	0.272777	0.835751	0.999959	0.002561	0.002561	0.000357	0.000000
V[16]=	1	0.5	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

La interpretación del resultado de esta prueba, aplicando el redondeo, nos indica que el estado futuro de los conceptos es: Se mantienen en buen estado P, la válvula manual 01 tiene la posibilidad de que también lo haga, y HPSC. El núcleo se encuentra en buen estado lo mismo que la contención, ya que VT, FG, FL y VN no aparecen lo que se asume como una contención en buen estado.

Prueba 2

Se indica la presencia de P, 01, X1, V, W que corresponden a los conceptos válvula de alivio, válvula manual para disponer del condensador, despresurizador, sistemas mitigantes a baja presión y sistema removedor de calor, respectivamente.

Tabla 5.29. Resultados de la prueba 2 escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
V[0]=	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[1]=	0.993307	0.500000	0.000045	0.000045	0.500000	0.993307	0.993307	0.500000	0.500000	0.500000	0.006693	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[2]=	0.924126	0.499943	0.000572	0.000021	0.499943	0.993079	0.993079	0.032816	0.075858	0.075858	0.299433	0.999996	0.000004	0.000004	0.000000	0.000000
V[3]=	0.923921	0.499286	0.000808	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.353019	0.406298	0.406298	0.815464	0.999989	0.000050	0.000050	0.000024	0.000000
V[4]=	0.923606	0.498990	0.000811	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.001515	0.115924	0.115924	0.471254	1.000000	0.000010	0.000010	0.000000	0.000000
V[5]=	0.923501	0.498986	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.134050	0.359020	0.359020	0.837865	0.999994	0.000059	0.000059	0.000019	0.000000
V[6]=	0.923499	0.498983	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.002171	0.142437	0.142437	0.727057	1.000000	0.000031	0.000031	0.000001	0.000000
V[7]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.031985	0.329115	0.329115	0.837418	0.999998	0.000059	0.000059	0.000014	0.000000
V[8]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.002933	0.161698	0.161698	0.816089	0.999999	0.000051	0.000051	0.000002	0.000000
V[9]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.017159	0.308210	0.308210	0.836899	0.999999	0.000059	0.000059	0.000012	0.000000
V[10]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.003621	0.176374	0.176374	0.826956	0.999999	0.000055	0.000055	0.000003	0.000000
V[11]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.014076	0.292788	0.292788	0.836429	0.999999	0.000059	0.000059	0.000010	0.000000
V[12]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.004233	0.187858	0.187858	0.829150	0.999999	0.000056	0.000056	0.000003	0.000000
V[13]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.012433	0.281041	0.281041	0.836010	0.999999	0.000058	0.000058	0.000009	0.000000
V[14]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.004768	0.196985	0.196985	0.830311	0.999999	0.000056	0.000056	0.000003	0.000000
V[15]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.011296	0.271913	0.271913	0.835643	0.999999	0.000058	0.000058	0.000008	0.000000
V[16]=	1	0.5	0	0	0.5	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

La interpretación del resultado de esta prueba, aplicando el redondeo, nos indica que el estado futuro de los conceptos es: Se mantienen en buen estado P, la válvula manual 01 tiene la posibilidad de que también lo haga,. Se activa RCIC en ausencia de HPCS. Se mantiene operando X1 y V. Los sistemas sobreviven (SUR) y lo importante: el núcleo se encuentra en buen estado lo mismo que la contención, ya que VT, FG, FL y VN no aparecen lo que se asume como una contención en buen estado.

Prueba 3

Se indica la presencia de SV, HPCS, W que corresponden a los conceptos: supresor de vapor, sistema de enfriamiento a alta presión y sistema removedor de calor, respectivamente.

Tabla 5.30. Resultados de la prueba 3 escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
V[0]=	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[1]=	0.006693	0.006693	0.500000	0.500000	0.006693	0.006693	0.006693	0.500000	0.500000	0.500000	0.006693	0.999952	0.000048	0.000048	0.000048	0.000009
V[2]=	0.078238	0.075858	0.483274	0.824839	0.075858	0.078235	0.078235	0.032791	0.075841	0.075841	0.299416	0.993854	0.006351	0.006351	0.000043	0.000000
V[3]=	0.115364	0.081933	0.316375	0.617328	0.015919	0.023362	0.023362	0.336404	0.406266	0.406266	0.813953	0.997708	0.009843	0.009843	0.004492	0.000002
V[4]=	0.236455	0.170530	0.271607	0.791337	0.043662	0.048807	0.048807	0.001349	0.113670	0.113670	0.491050	0.999867	0.007190	0.007190	0.000121	0.000000
V[5]=	0.376276	0.204560	0.115584	0.719786	0.018768	0.023831	0.023831	0.117670	0.361478	0.361478	0.837948	0.998884	0.012396	0.012396	0.003873	0.000001
V[6]=	0.609421	0.359411	0.051947	0.788517	0.026625	0.029893	0.029893	0.001834	0.138626	0.138626	0.742654	0.999849	0.009113	0.009113	0.000237	0.000000
V[7]=	0.823074	0.435429	0.007813	0.771658	0.019029	0.022029	0.022029	0.028138	0.333074	0.333074	0.837614	0.999849	0.005866	0.005866	0.001409	0.000000
V[8]=	0.894550	0.490235	0.001847	0.791554	0.020668	0.023019	0.023019	0.002639	0.158102	0.158102	0.818922	0.999946	0.003413	0.003413	0.000120	0.000000
V[9]=	0.919970	0.497692	0.000983	0.788579	0.018748	0.020986	0.020986	0.016949	0.311930	0.311930	0.837088	0.999953	0.002755	0.002755	0.000559	0.000000
V[10]=	0.922980	0.498771	0.000834	0.793528	0.019023	0.021083	0.021083	0.003385	0.173296	0.173296	0.827095	0.999962	0.002463	0.002463	0.000108	0.000000
V[11]=	0.923416	0.498957	0.000817	0.793145	0.018567	0.020588	0.020588	0.014152	0.295875	0.295875	0.836582	0.999958	0.002579	0.002579	0.000451	0.000000
V[12]=	0.923487	0.498978	0.000815	0.794328	0.018602	0.020577	0.020577	0.003991	0.185181	0.185181	0.829087	0.999962	0.002446	0.002446	0.000126	0.000000
V[13]=	0.923496	0.498982	0.000814	0.794319	0.018494	0.020457	0.020457	0.012464	0.283628	0.283628	0.836167	0.999959	0.002569	0.002569	0.000399	0.000000
V[14]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.794602	0.018495	0.020446	0.020446	0.004519	0.194640	0.194640	0.830280	0.999962	0.002460	0.002460	0.000143	0.000000
V[15]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.794620	0.018469	0.020417	0.020417	0.011282	0.274101	0.274101	0.835805	0.999959	0.002562	0.002562	0.000362	0.000000
V[16]=	1	0.5	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

La interpretación del resultado de esta prueba, aplicando el redondeo, nos indica que el estado futuro de los conceptos es: la válvula de alivio P está en buen estado, la válvula manual 01 tiene la posibilidad de que también lo haga. El supresor de vapor deja de funcionar, HPCS se mantiene en buen estado. Los sistemas sobreviven (SUR) y lo importante: el núcleo se encuentra en buen estado lo mismo que la contención, ya que VT, FG, FL y VN no aparecen lo que se asume como una contención en buen estado.

Prueba 4

Se indica la presencia de P, 01, X1, V, Y, SUR que corresponden a los conceptos: válvula de alivio, válvula manual para disponer del condensador, despresurizador, sistemas mitigantes a baja presión, venteo y supervivencia de sistemas, respectivamente.

Tabla 5.31. Resultados de la prueba 4 escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
V[0]=	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[1]=	0.993307	0.500000	0.000045	0.000045	0.500000	0.993307	0.993307	0.000045	0.500000	0.006693	0.500000	1.000000	0.001428	0.000000	0.000000	0.000000
V[2]=	0.924126	0.499943	0.000572	0.000021	0.499943	0.993079	0.993079	0.032590	0.493419	0.075359	0.838860	0.999996	0.000624	0.000004	0.000004	0.000000
V[3]=	0.923921	0.499286	0.000808	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.004535	0.407643	0.077973	0.815634	0.999999	0.000408	0.000006	0.000003	0.000000
V[4]=	0.923606	0.498990	0.000811	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007704	0.404231	0.115042	0.835803	0.999999	0.000303	0.000011	0.000005	0.000000
V[5]=	0.923501	0.498986	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.005899	0.360365	0.116847	0.833617	0.999999	0.000244	0.000014	0.000004	0.000000
V[6]=	0.923499	0.498983	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007352	0.358219	0.141486	0.834864	0.999999	0.000196	0.000017	0.000005	0.000000
V[7]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.006536	0.330358	0.142826	0.833861	0.999999	0.000170	0.000019	0.000005	0.000000
V[8]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007494	0.328848	0.160762	0.834425	0.999999	0.000148	0.000023	0.000005	0.000000
V[9]=	1	0.5	0	0	0.5	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

La interpretación del resultado de esta prueba, aplicando el redondeo, nos indica que el estado futuro de los conceptos es: Se mantienen en buen estado la válvula de alivio P, la válvula manual 01 tiene la posibilidad de que también lo haga, RCIC presenta una posibilidad de 50% (lo cual podría interpretarse que se debe a la ausencia de HPCS, razón para entrar como respaldo RCIC). Se mantiene operando X1 y V. Los sistemas sobreviven (SUR) y lo importante: el núcleo se encuentra en buen estado lo mismo que la contención, ya que VT, FG, FL y VN no aparecen lo que se asume como una contención en buen estado. Sólo que en este escenario hay una *inconsistencia*, ya que se indicó como entrada el *uso del venteo*, razón suficiente y necesaria para que la contención *resultara venteadada* pero no fue así.

Prueba 5

Se indica la presencia de P, 01, X1, V, R, SUR que corresponden a los conceptos: válvula de alivio, válvula manual para disponer del condensador, despresurizador, sistemas mitigantes a baja presión, fuga y sobrevivencia de sistemas, respectivamente.

Tabla 5.32. Resultados de la prueba 5 escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
V[0]=	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[1]=	0.993307	0.500000	0.000045	0.000045	0.500000	0.993307	0.993307	0.000045	0.006693	0.500000	0.500000	1.000000	0.000000	0.001428	0.000000	0.000000
V[2]=	0.924126	0.499943	0.000572	0.000021	0.499943	0.993079	0.993079	0.032590	0.075359	0.493419	0.838860	0.999996	0.000004	0.000624	0.000004	0.000000
V[3]=	0.923921	0.499286	0.000808	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.004535	0.077973	0.407643	0.815634	0.999999	0.000006	0.000408	0.000003	0.000000
V[4]=	0.923606	0.498990	0.000811	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007704	0.115042	0.404231	0.835803	0.999999	0.000011	0.000303	0.000005	0.000000
V[5]=	0.923501	0.498986	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.005899	0.116847	0.360365	0.833617	0.999999	0.000014	0.000244	0.000004	0.000000
V[6]=	0.923499	0.498983	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007352	0.141486	0.358219	0.834864	0.999999	0.000017	0.000196	0.000005	0.000000
V[7]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.006536	0.142826	0.330358	0.833861	0.999999	0.000019	0.000170	0.000005	0.000000
V[8]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007494	0.160762	0.328848	0.834425	0.999999	0.000023	0.000148	0.000005	0.000000
V[9]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.006888	0.161801	0.309339	0.833762	0.999999	0.000025	0.000133	0.000005	0.000000
V[10]=	1	0.5	0	0	0.5	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

La interpretación del resultado de esta prueba, aplicando el redondeo, nos indica que el estado futuro de los conceptos es: Se mantienen en buen estado la válvula de alivio P, la válvula manual 01 tiene la posibilidad de que también lo haga,. RCIC presenta una posibilidad de 50% (lo cual podría interpretarse que se debe a la ausencia de HPCS, razón para entrar como respaldo RCIC). Se mantiene operando X1 y V. Los sistemas sobreviven (SUR) y lo importante: el núcleo se encuentra en buen estado lo mismo que la contención, ya que VT, FG, FL y VN no aparecen lo que se asume como una contención en buen estado. Sólo que en este escenario hay una *inconsistencia*, ya que se indicó como entrada el *uso del proceso de fuga*, razón suficiente y necesaria para que la contención *resultara fugada* pero no fue así.

Prueba 6

Se indica la presencia de P, 01, X1, V que corresponden a los conceptos: válvula de alivio, válvula manual para disponer del condensador, despresurizador y sistemas mitigantes a baja presión, respectivamente.

Tabla 5.33. Resultados de la prueba 6 escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
V[0]=	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[1]=	0.993307	0.500000	0.000045	0.000045	0.500000	0.993307	0.993307	0.500000	0.500000	0.500000	0.500000	0.999990	0.000010	0.000010	0.000010	0.000002
V[2]=	0.924126	0.499943	0.000572	0.000021	0.499943	0.993079	0.993079	0.002871	0.075855	0.075855	0.299430	1.000000	0.000004	0.000004	0.000000	0.000000
V[3]=	0.923921	0.499286	0.000808	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.353032	0.406302	0.406302	0.836941	0.999987	0.000059	0.000059	0.000027	0.000000
V[4]=	0.923606	0.498990	0.000811	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.001361	0.115920	0.115920	0.471237	1.000000	0.000010	0.000010	0.000000	0.000000
V[5]=	0.923501	0.498986	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.134065	0.359024	0.359024	0.837969	0.999994	0.000059	0.000059	0.000019	0.000000
V[6]=	0.923499	0.498983	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.002170	0.142435	0.142435	0.727042	1.000000	0.000031	0.000031	0.000001	0.000000
V[7]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.031989	0.329118	0.329118	0.837419	0.999998	0.000059	0.000059	0.000014	0.000000
V[8]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.002933	0.161696	0.161696	0.816086	0.999999	0.000051	0.000051	0.000002	0.000000
V[9]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.017159	0.308212	0.308212	0.836899	0.999999	0.000059	0.000059	0.000012	0.000000
V[10]=	1	0.5	0	0	0.5	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

La interpretación del resultado de esta prueba, aplicando el redondeo, nos indica que el estado futuro de los conceptos es: Se mantienen en buen estado P, la válvula manual 01 tiene la posibilidad de que también lo haga,. RCIC tiene 50% de posibilidades de que se active en ausencia de HPCS. Se mantiene operando X1 y V. Los sistemas sobreviven (SUR) y lo importante: el núcleo se encuentra en buen estado lo mismo que la contención, ya que VT, FG, FL y VN no aparecen lo que se asume como una contención en buen estado. Sólo que en este escenario hay una *inconsistencia*, ya que de acuerdo a la entrada que se proporcionó, tendría que haber entrado en acción un sistema como el removedor de calor (W); si éste no estuviera disponible, entonces debería de iniciar un proceso de venteo o de fugado. Si lo anterior no se hubiera llevado a cabo, el resultado tendría que haber sido, al menos (ya que los sistemas sobrevivieron), *fallada* pero no fue así.

Prueba 7

P, 01, X1, V, Y Se indica la presencia de P, 01, X1, V, Y que corresponden a los conceptos: válvula de alivio, válvula manual para disponer del condensador, despresurizador, sistemas mitigantes a baja presión y venteo, respectivamente.

Tabla 5.34. Resultados de la prueba 7 escenario LOCA pequeño

	P	01	SV	HPCS	RCIC	X1	V	W	Y	R	SUR	NB	VT	FG	FL	VN
V[0]=	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
V[1]=	0.993307	0.500000	0.000045	0.000045	0.500000	0.993307	0.993307	0.006693	0.500000	0.006693	0.500000	0.999990	0.001428	0.000000	0.000000	0.000000
V[2]=	0.924126	0.499943	0.000572	0.000021	0.499943	0.993079	0.993079	0.032590	0.493419	0.075359	0.834315	0.999996	0.000604	0.000004	0.000004	0.000000
V[3]=	0.923921	0.499286	0.000808	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.004639	0.407618	0.077980	0.815634	0.999999	0.000408	0.000006	0.000003	0.000000
V[4]=	0.923606	0.498990	0.000811	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007704	0.404222	0.115055	0.835731	0.999999	0.000303	0.000011	0.000005	0.000000
V[5]=	0.923501	0.498986	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.005901	0.360351	0.116851	0.833616	0.999999	0.000244	0.000014	0.000004	0.000000
V[6]=	0.923499	0.498983	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007352	0.358214	0.141495	0.834863	0.999999	0.000196	0.000017	0.000005	0.000000
V[7]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.006535	0.330348	0.142829	0.833861	0.999999	0.000170	0.000019	0.000005	0.000000
V[8]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007494	0.328844	0.160769	0.834425	0.999999	0.000148	0.000023	0.000005	0.000000
V[9]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.006888	0.309332	0.161803	0.833762	0.999999	0.000133	0.000025	0.000005	0.000000
V[10]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007575	0.308211	0.175487	0.834182	0.999999	0.000121	0.000028	0.000005	0.000000
V[11]=	0.923497	0.498982	0.000814	0.000021	0.499974	0.993072	0.993072	0.007103	0.293800	0.176311	0.833706	0.999999	0.000112	0.000030	0.000005	0.000000
V[12]=	1	0.5	0	0	0.5	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

La interpretación del resultado de esta prueba, aplicando el redondeo, nos indica que el estado futuro de los conceptos es: Se mantienen en buen estado la válvula de alivio P, la válvula manual 01 tiene la posibilidad de que también lo haga,. RCIC presenta una posibilidad de 50% (lo cual podría interpretarse que se debe a la ausencia de HPCS, razón para entrar como respaldo RCIC). Se mantiene operando X1 y V. Los sistemas sobreviven (SUR) y lo importante: el núcleo se encuentra en buen estado lo mismo que la contención, ya que VT, FG, FL y VN no aparecen lo que se asume como una contención en buen estado. Sólo que en este escenario hay una *inconsistencia*, ya que se indicó como entrada el *uso del venteo*, razón suficiente y necesaria para que la contención *resultara venteadada* pero no fue así.

5.6.6 CONCLUSIONES DE ANÁLISIS, PRUEBAS Y RESULTADOS

El objetivo que se persigue cuando la planta entra al escenario LOCA pequeño es garantizar el enfriamiento adecuado del núcleo mitigando para ello el efecto del evento iniciador: pérdida "pequeña" del refrigerante destinado a mantener al núcleo dentro del rango de temperatura para el funcionamiento del mismo en condiciones normales. Dicho de otra manera, significa que todos los elementos se ven involucrados en los intentos por mitigar los efectos de la pérdida de refrigerante [6, 12, 26]. Por ello, lo que se pretende es que el análisis nos permita establecer los mecanismos posibles para mitigar las fallas antes de que sus efectos lleguen a afectar la contención y al núcleo mismo, es decir, estamos anticipándonos para evitar en lo posible los accidentes graves, de ahí la importancia del carácter predictivo que la lógica difusa logra al establecer las relaciones de causalidad mediante los mapas cognoscitivos difusos basados en la experticia de los expertos.

La propuesta que estamos haciendo contrasta con la técnica de análisis que actualmente se utiliza dentro de la planta, la cual citando al reporte antes mencionado [12], se desarrollan de árboles de eventos usando el conocimiento y experiencia adquirida para otros reactores similares.

La ventaja, que proporciona la lógica difusa como técnica del sistema experto propuesto, es que proporciona de manera predictiva el escenario futuro a partir de una falla inicial permitiendo relacionar acciones de mitigación de manera automática. Lo anterior constituye una ayuda en la toma de decisiones en situaciones de riesgo. Dicho de otra manera, la automatización del análisis del proceso de la toma de decisiones, en situaciones de riesgo, que propone el sistema experto propuesto, reduce el error en la toma de decisiones por parte del humano sometido a la presión de encontrarse en una situación de riesgo de accidente grave. Cabe mencionar que el sistema experto proporciona una ayuda en el proceso de toma de decisiones, no pretende, en ningún aspecto, reemplazar el juicio del humano en dicho proceso.

Respecto a las inconsistencias encontradas bajo ciertos escenarios de prueba, una de las perspectivas a futuro, es utilizar las ecuaciones estructurales como herramienta para ajustar los pesos de las relaciones de causalidad.

Conclusiones

Uno de los puntos importantes para el desarrollo de este trabajo fue contar con una herramienta de elicitación del conocimiento experto que la facilitara, pero sobre todo, que garantizara una aproximación de la conducta del experto lo más apegada a la realidad. Esta herramienta fue el análisis cognoscitivo de tareas debido a la sistematicidad de su desarrollo.

Una vez que se obtuvo esta base importante en el desarrollo del sistema experto propuesto, se aplicó una de las técnicas de inteligencia artificial, en el análisis y diseño de la representación del conocimiento y el razonamiento. Específicamente se utilizó la técnica de los mapas cognoscitivos difusos. Mediante esta técnica, el sistema es capaz de obtener el estado futuro de los elementos que conforman el modelo, a partir de parámetros iniciales. Lo anterior constituye una referencia valiosa para la toma de decisiones por parte del supervisor humano, ya sea durante un procedimiento de emergencia o durante una falla del sistema.

Es así como los mapas cognitivos difusos nos permiten manejar la complejidad del análisis de fallas en el funcionamiento del sistema, así como la complejidad del análisis de efectos de parámetros (los destinados a controlar en cada línea de defensa) durante los procedimientos de emergencia, involucrando a todos los elementos del sistema en cuestión, como un todo razonamiento distribuido paralelo). Sobretodo si se compara con el método tradicional de los árboles de fallas y el diagrama de efectos utilizado por el experto, donde los elementos del sistema son considerados de forma individual para el proceso de razonamiento.

La interpretación de los resultados obtenidos ayuda, de manera automática, al supervisor encargado de vigilar el funcionamiento de la planta a tomar decisiones en situaciones de riesgo. Este punto es realmente crítico cuando la información disponible para el supervisor es muy extensa ya que dificulta tomar una decisión adecuada. Con la interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo a un estado actual permitirá tomar una decisión de manera más confiable y rápida.

Este sistema experto se plantea como una herramienta de ayuda, que no pretende sustituir a las ya existentes, sino complementarlas. Además de su potencial para la capacitación y entrenamiento que asiste en la tarea de toma de decisiones del supervisor. El reto del supervisor, en este caso es lograr mantener en operación estable a la planta (núcleo y contención en buen estado); y de restaurar su funcionamiento normal, en caso de enfrentar una emergencia como LOCA pequeña.

Dificultades

Si bien es cierto que la especialización en un área específica permite obtener un conocimiento profundo del objeto de estudio, también es cierto, que los problemas del mundo real difícilmente pueden ser resueltos dentro de una misma área. Por ello, actualmente, se conforman equipos de trabajo interdisciplinarios para obtener una solución integral que logre rendir mayores frutos comparado con las obtenidas de la manera clásica. Sin embargo, la interdisciplinariedad por su lado, plantea problemas, principalmente, de comunicación entre los integrantes de las distintas áreas que conforman el equipo. Esto se debe, entre otras cosas, a la terminología utilizada en cada área. Lo mismo sucede con el trabajo del ingeniero del conocimiento cuando trata de elicitar el conocimiento de un experto. Por ello, esta sería, tal vez la mayor dificultad a la que nos enfrentamos, en el desarrollo de este trabajo.

Otro punto importante que cabe mencionar, es el trabajo conjunto con el experto, pues difícilmente se logra explicitar el conocimiento de una sola vez. Ello, se debe principalmente a la tendencia a obviar pasos en la resolución de problemas por parte del experto, casi siempre de manera inconsciente. Lo anterior se traduce en unas primeras aproximaciones equivocadas y en el mejor de los casos, en la obtención de un modelo aproximado pero incompleto.

Por otro lado, la gran cantidad de información sobre el tema, dificulta identificar las partes esenciales para la resolución del caso de estudio en cuestión. Pero estas dificultades forman parte del proceso de un trabajo conjunto.

Algo que no hay que perder de vista es que alcanzar el objetivo de obtener los modelos mentales del experto, no significa convertirnos en uno. Por lo anterior, es importante contar con herramientas para elicitar el conocimiento que nos permitan sentar una sólida base para obtener una representación del conocimiento y del razonamiento experto lo más aproximado a la realidad. Para nuestro caso de estudio, la herramienta que nos proporcionó esa base fue el análisis cognoscitivo de tareas, mediante el cual se logró explicitar la conducta cognoscitiva del experto. Esta herramienta es utilizada ampliamente por los psicólogos cognoscitivos, para explicitar los componentes cognoscitivos de una tarea.

Trabajos futuros

Son diversas las perspectivas futuras que nos plantea este trabajo. A continuación se menciona y se describen muy brevemente algunos de ellos.

Ecuaciones Estructurales

El más inmediato es el uso de un método de análisis multivariado como el de las ecuaciones estructurales. Las ecuaciones estructurales nos permiten analizar simultáneamente conjuntos amplios de variables. Por ello, este método crearía un modelo que nos permitirá validar las relaciones establecidas en el modelo teórico, tomando en cuenta a un conjunto amplio de expertos. Actualmente, la validación de nuestro trabajo correspondió a 2 expertos y a la información contenida en guías de análisis de fallas (trabajo de varios expertos, incluido uno de los expertos).

La técnica del modelo de ecuaciones estructurales se considera una extensión de varias técnicas multivariadas como la regresión múltiple, el análisis factorial principalmente y el análisis de senderos, abarca una familia entera de modelos como el análisis de la estructura de la covarianza, análisis de variable latente, análisis factorial confirmatorio [ref Castañeda y Cataluña].

Los modelos de ecuaciones estructurales se caracterizan por dos elementos:

1. Estimación de relaciones de dependencias múltiples y cruzadas, y
2. La capacidad de representar conceptos no observados en estas relaciones y tener en cuenta el error de medida en el proceso de estimación.

La diferencia con las técnicas de análisis multivariado es la capacidad de analizar relaciones para cada subconjunto de variables. Además de permitir interrelaciones entre algunas variables de estos subconjuntos.

Los sistemas de ecuaciones estructurales permiten, además de estimar relaciones múltiples, introducir conceptos o variables latentes al análisis, que en interrelación con las ya establecidas fortalecen las correlaciones utilizadas. De esta manera se pueden realizar estimaciones más precisas de los coeficientes estructurales. Los coeficientes representan la participación de cada variable en el sistema y tienen una correspondencia con los valores que nosotros establecemos para las relaciones entre los nodos de un mapa cognoscitivo difuso.

Aprendizaje en MCDs

Oro aspecto muy interesante es introducir el aprendizaje en los mapas cognoscitivos porque a través de él, se obtiene la característica de adaptabilidad. Lo anterior significa que un sistema aprende o se adapta, se auto-organiza cuando una muestra de datos cambia los parámetros del sistema.

El aprendizaje implica cambio debido a que codifica información, es decir, un sistema aprende un patrón si el sistema codifica el patrón en su estructura. La estructura del sistema cambia cuando el sistema aprende la información.

Se puede usar un criterio de codificación conductual: el sistema ha aprendido el par estímulo-respuesta (x_i, y_i) si responde con y_i cuando x_i estimula al sistema, en otras palabras, el sistema mapea entradas similares a salidas similares y así estima una función continua. La versión más simple surge del intento de Kosko [7, 8] por estimar dinámicamente la estructura causal de los mapas cognitivos difusos de datos muestrales.

Uso de una arquitectura multiagente reactiva

La importancia de tener una herramienta como el análisis cognoscitivo de tareas es que la base que nos proporciona no solo es aprovechada por la técnica de los mapas cognoscitivos difusos sino también por los agentes reactivos [agentes reactivos de Ana Lilia]. Partiendo del diagrama conductual de la figura 5.5 (capítulo 5), se pueden construir agentes encargados de cada una de las tareas de las que se compone la conducta del experto. Un agente en cada nivel señalado que fuera disparado por la conducta del nivel anterior.

MCDs anidados

Continuando en la misma línea de los mapas cognoscitivos, se pueden anidar otros mapas dentro del mapa cognoscitivo de los sistemas mitigantes, un mapa por cada sistema o elemento mitigante que interviene en la estrategia de mitigación. El anidamiento puede llegar incluso a nivel de interruptores, válvulas y fusibles.

El gran reto es modelar la mayor parte de los sistemas que intervienen en la planta para tener en todo momento *una asistencia en la toma de decisiones de forma automática*.

REFERENCIAS

- [1] Barón, J. H., y Zárate, S. M. 1998. Estudio sobre alternativas de inertización de contenciones de centrales nucleares. Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina, publicado como PI-20/98 de la Autoridad Regulatoria Nuclear. *IV Congreso Regional en Seguridad Radiológica y Nuclear*, La Habana, Cuba, 19 - 23 de octubre. <http://200.0.198.11/MenoriaT/Pi14.pdf>
- [2] Castañeda, S. 1993. Procesos cognitivos y educación médica. *Serie Seminarios*, No. 1. Facultad de Medicina – UNAM, México, D. F.
- [3] Castañeda, S. 2006. *Evaluación del aprendizaje en el nivel universitario, elaboración de exámenes y reactivos-objetivos*. UNAM-Facultad de Psicología, Proyecto CONACYT 40608-H.
- [4] Darrel, T. 1996. *Library of Fuzzy Logic Based Utilities*. Pleasant Crab Consulting
- [5] De Arriaga-Gómez, F., Laureano-Cruces, A., Espinosa-Paredes, G. 2004. Approximate reasoning for the implementation of the successive approximation method. *Memorias en CD, ISBN: 970-36-0155-3. XVII Congreso Nacional y III Congreso Internacional de Informática y Computación de la ANIEI*. Tepic, Nayarit, 20-22 de octubre.
- [6] Espinosa-Paredes, G., Laureano-Cruces, A. L., Nuñez-Carrera, A., Mora-Torres, M. 2007. Emergency Management for a Nuclear Power Plant Using Fuzzy Cognitive Maps.
- [7] Fernández-Alarcón, V. 2004. *Relaciones encontradas entre las dimensiones de las estructuras organizativas y los componentes del constructo "capacidad de absorción": El caso de empresas ubicadas en el territorio español*. Tesis doctora, Department d'Organització d'Empreses - Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1214104-092520//01Vfa01de10.pdf
- [8] García, H., Reyes C. y Morales, R. 2002. Diseño e Implementación de Mapas Cognoscitivos Difusos para Tutoriales Inteligentes. *Memorias del XV Congreso Nacional y I Congreso Internacional de Informática y Computación de la ANIEI*. Vol. 1, 51–59.
- [9] Glasstone, S., Sesonske, A. 1994. *Nuclear Reactor Engineering: Reactor Design Basics*. Chapman & Hall
- [10] González, M., López, A., Aguirre, A., Marcos, J. 2001. Guía Técnica Específica para Elaboración de Procedimientos de Emergencia PSTG, Revisión 6 para la Unidad 1, Revisión 2 para la Unidad 2, por aumento de potencia y por combustible GE12 (Basada en las EPGs Revisión 4). CFE y EMERSIS.
- [11] Hee-Cheol, K. Safety Analysis. KAERI Nuclear Training Center. [http://www.kntc.re.kr/openlec/nuc/NPRT/module2/module2_3/module2_3_1.htm](http://www.kntc.re.kr/openlec/nuc/NPRT/module2/module2_3/module2_3_1/2_3_1.htm)
- [12] Huerta, A., Aguilar, O., Núñez, A., López, R. 1993. Análisis de Eventos Internos para la Unidad 1 de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde - Eventos Inicadores y Secuencias de Accidentes. Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.
- [13] Khan, M.S., Chong, A., Quaddus, M. 1987. Fuzzy Cognitive Maps and Intelligent Decision Support – a Review. School of Information Technology, Murdoch University, Graduate School of Business, Curtin University of Technology, GPO Box U.
- [14] Konar, A. 2001. *Artificial Intelligence and Soft Computing - Behavioral and Cognitive Modeling of the Human Brain* (ed.) CRC Press.

- [15] Konar, A., Jain, L. 2005. *Cognitive Engineering: A Distributed Approach to Machine Intelligence*. Springer Verlag-London.
- [16] Kosko, B. 1986. Fuzzy Cognitive Maps, *International Journal of Man-Machine Studies*. 24, 65-75.
- [17] Kosko, B. 1992. *Neural Networks and Fuzzy Systems. A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*, Prentice-Hall, New Jersey.
- [18] Laureano-Cruces, A. 2000. *Interacción dinámica en sistemas de enseñanza inteligentes*. Tesis de Doctorado en Investigación Biomédica Básica, Instituto de Investigaciones Biomédicas - UNAM. <http://delfosis.uam.mx/~ana/>
- [19] Laureano-Cruces, A., Barceló-Aspeitia, A. A. 2003. Formal verification of multi-agent systems behaviour emerging from cognitive task analysis. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. Vol. 15, No. 4, 407-431.
- [20] Laureano-Cruces, A., De Arriaga-Gómez, F. 2000. Reactive agent design for intelligent tutoring systems. *Cybernetics and Systems*, 31 (1): pp 1-47.
- [21] Laureano-Cruces, A., De Arriaga-Gómez, F., García-Alegre, M. 2001. Cognitive task analysis: a proposal to model reactive behaviors. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 13 227-239.
- [22] Laureano-Cruces, A. and Espinosa-Paredes, G. 2005. Behavioral design to model a reactive decision of an expert in geothermal wells. *International Journal of Approximate Reasoning* 39 (2005) 1-28.
- [23] Laureano-Cruces, A., Ramírez-Rodríguez, J., Terán-Gilmore, A. 2004. Evaluation of the Teaching-Learning Process with Fuzzy Cognitive Maps. *Serie Lecture Notes in Artificial Intelligence*. ISBN: 3-540-23806-9. Vol. 3315. 922-931.
- [24] Laureano-Cruces, A, Teran-Gilmore, A., Rodriguez-Aguilar, R. 2005. Cognitive and Affective Interaction in a Pedagogical Agent. *Memorias en CD, ISBN: 970-31-0528-9. En el XVIII Congreso Nacional y IV Congreso Internacional de Informática y Computación de la ANIEI*. Torreón, Coah., 26-28 de octubre. <http://delfosis.uam.mx/~ana/> *
- [25] Laureano-Cruces, A., Ramírez-Rodríguez, J., Mora-Torres, M., Escarela-Pérez, R. 2006. An Interactive Design to Show the Cognitive and Affective Interventions of an Intelligent Learning System. *Interactive Learning Environment*. (Sometido). ISSN:0888-613X Abril/2007.
- [26] Laureano-Cruces, A., Ramírez-Rodríguez, J., Mora-Torres, M., Espinosa-Paredes, G. 2006. Modeling a Decision Making Process in a Risk Scenario: LOCA in a Nucleoelectric Plant Using Fuzzy Cognitive Maps. *Research in Computing Science*. 26, 3-13.
- [27] Laureano-Cruces, A., Santillán-González, A., Méndez-Gurrola I. I. 2006. Mapas Cognitivos Difusos: Una Representación para Predecir los Efectos de las Supernovas. *Memorias en CD. XIX Congreso Nacional y V Congreso Internacional de Informática y Computación de la ANIEI*. ISBN: 970-31-0751-6. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 25-27 de octubre de 2006.
- [28] Marcellin-Jaques, S., Obregón-Sánchez, A., Flores-Illescas, C., Castillo-Barrera, F. E., Pérez-Luna, E. 1997. *Inteligencia Artificial, Aprendizaje y Sistemas Expertos*. Maestría en Ciencias de la Computación, UACPyP del CCH, con sede en el IIMAS-UNAM.
- [29] Méndez-Gurrola, I. I. 2007. *Sistema basado en el conocimiento para la predicción de los efectos de una supernova en el medio interestelar*. Tesis de Maestría en Ciencias

- de la Computación, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
<http://newton.azc.uam.mx/mcc>.
- [30] Mukaidono, M. 2001. *Fuzzy Logic for Beginners*, World Scientific.
- [31] Patel, A., Kosko, B. 2006. Mutual-Information Noise Benefits in Brownian Models of Continuous and Spiking Neurons. *2006 International Joint Conference on Neural Networks*. Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada July 16-21.
- [32] Peláez, C. E., Bowles, J. B. 1995. Applying Fuzzy Cognitive-Maps Knowledge-Representation to Failure Modes Effects Analysis. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. IEEE 0149-144X/95
- [33] Peláez, C. E., Bowles, J. B. 1996. Using Fuzzy Cognitive Maps as a System Model for Failure Modes and Effects Analysis. *Information Sciences* 88, 177-199.
- [34] Ramírez González Tzitziki. *Algoritmo de Planificación Distribuido en un Sistema de Control Basado en una Arquitectura Multiagente en Tiempo Real* (2006). Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación. Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco. <http://newton.azc.uam.mx/mcc>.
- [35] Ramírez-González, T. Quiñones-Reyes, P. Benítez-Pérez, H., Laureano-Cruces, A., García-Nocetti, F. 2006, Reconfigurable Fuzzy Takagi-Sugeno Networked Control using Cooperative Agents and xPC Target. *Proceedings 5th International Symposium on Robotics and Automation*. ISBN: 970-769-070-4. 25-28 de agosto. San Miguel Regla, Hidalgo, México.
- [36] Rescher, N. 1981. *Sistematización Cognoscitiva*. Ed. Siglo XXI
- [37] Reyes-Saldaña, J. F. y García-Flores, R. 2005. Toma de decisiones mediante técnicas de razonamiento incierto. *Ingenierías*, Vol. VIII, No. 28, 32-42.
- [38] Russell, S. J. y Norvig, P. 2004. *Inteligencia artificial un enfoque moderno*. Pearson Prentice Hall.
- [39] Simon, H. A. 2006. *Las ciencias de lo artificial*. Ed. Comares (Granada, España) auspiciada por la Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial (México), la Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Cuajimalpa y el Institut de Dret y Tecnologia de la Universitat Autònoma de Barcelona (España).
- [40] Stylios, C. D., Groumpos, P. P. 1999. Fuzzy Cognitive Maps: a model for intelligent supervisory control systems. *Computers in Industry* 39, 229-238.
- [41] Tolman, E. C., 1932. *Purposive Behavior in Animals and Men*. University of California Press.
- [42] Uhrig, R. E., Tsoukalas, L. H. 2003. Multi-Agent Based Anticipatory Control for Enhancing the Safety and Performance of Generation-IV Nuclear Power Plants During Long-Term Semi-Autonomous Operation. *Progress in Nuclear Energy. Elsevier Science Ltd*. Vol.43, 113-120
- [43] U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2007. *NRC: Reactors Concepts Manual*, U. S. Nuclear Regulatory Commission. <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/reactors.html> & <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>
- [44] Vapnik, N. V. 1998. *Statistical Learning Theory*. John Wiley & Sons.
- [45] Von Raesfeld-Porras, P. A. 2000. *Campestre: Aplicación de mapas cognitivos difusos a VRML en un ambiente virtual*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería de Sistemas Computacionales; Universidad de las Américas, Puebla.

Apéndice

MANUAL DE OPERACIÓN DEL PROGRAMA DE
EVALUACIÓN

- 1) El programa es un archivo ejecutable (Menú.exe). Al abrir despliega la pantalla siguiente:



```
C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Uector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion:
```

El cursor espera la opción a elegir para desplegar el menú correspondiente.

- 2) Elegir la opción 2 para indicar la matriz a utilizar.



```
C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Uector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
```

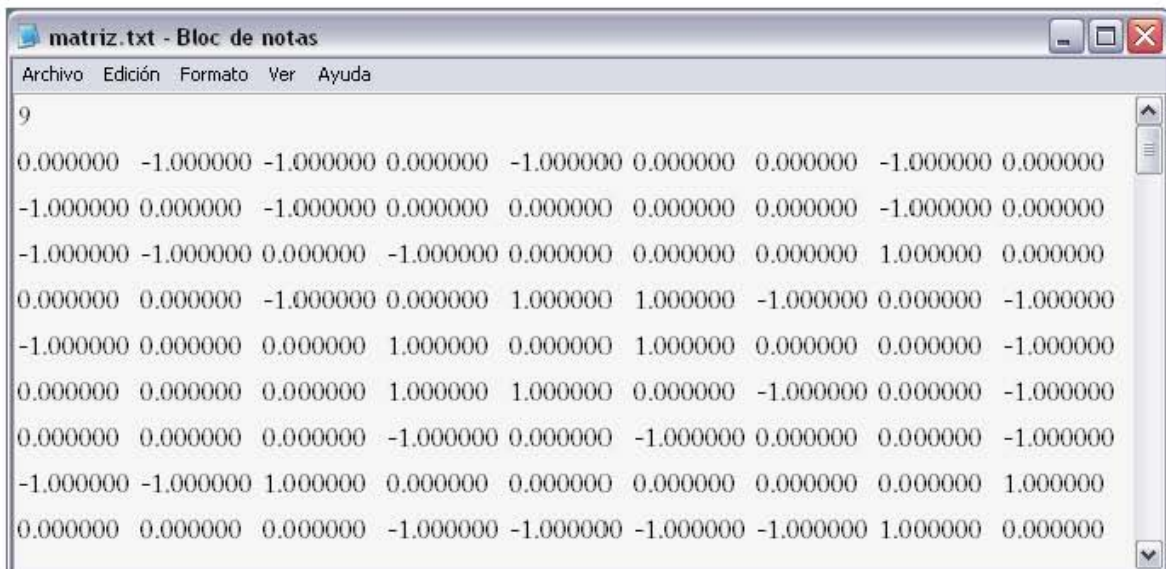
En seguida se despliega el menú correspondiente en la misma pantalla:



```
C:\MENU.exe
*****
<1> Cambiar Vector.
<2> Cambiar Matriz.
<3> Ejecutar.
<4> Salir.
Opcion: 2
*****
<1> Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
<2> Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion:
```

El cursor espera la opción a elegir: leer una matriz o crear una nueva matriz, en ambas opciones se indica el formato del nombre del archivo entre paréntesis.

En nuestro caso ya tenemos un archivo con la matriz creada y es el siguiente:



```
matriz.txt - Bloc de notas
Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
9
0.000000 -1.000000 -1.000000 0.000000 -1.000000 0.000000 0.000000 -1.000000 0.000000
-1.000000 0.000000 -1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 -1.000000 0.000000
-1.000000 -1.000000 0.000000 -1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000
0.000000 0.000000 -1.000000 0.000000 1.000000 1.000000 -1.000000 0.000000 -1.000000
-1.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 -1.000000
0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 1.000000 0.000000 -1.000000 0.000000 -1.000000
0.000000 0.000000 0.000000 -1.000000 0.000000 -1.000000 0.000000 0.000000 -1.000000
-1.000000 -1.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
0.000000 0.000000 0.000000 -1.000000 -1.000000 -1.000000 -1.000000 1.000000 0.000000
```

3) Elegir la opción 1:



```
C:\MENU.exe

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
    Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
    Opcion: 1
```

En seguida se despliega lo siguiente:



```
C:\MENU.exe

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
    Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
    Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo:
```

Teclar el nombre del archivo con la matriz creada (matriz.txt):

```

C:\> C:\MENU.exe

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Tecllea el Nombre del Archivo: matriz.txt
    
```

En seguida se despliega nuevamente el menú principal:

```


C:\> C:\MENU.exe

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Tecllea el Nombre del Archivo: matriz.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion:
    
```

En caso de querer generar la matriz directamente con el programa elegir la opción 2:



```
C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 2
```

En seguida, solicita que se proporcione el nombre del archivo de la matriz a generar.



```
C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo:
```

a) *Teclear el nombre con el que se desea identificar la matriz:*

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: matriz2.txt
    
```

Solicita, entonces se indique el número de columnas:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: matriz2.txt
Teclee el Numero de columnas: _
    
```

- b) *Teclear el número de columnas (número de nodos del mapa desarrollado a lo largo de la metodología en la sección 5.6.2 y reflejado en la Tabla 5.5 por ejemplo).*

```

C:\MENU.exe
*****
<1> Cambiar Vector.
<2> Cambiar Matriz.
<3> Ejecutar.
<4> Salir.
Opcion: 2
*****
<1> Leer una Matriz Existente <matriz.ext>.
<2> Crear una Nueva Matriz <matriz.new>.
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: matriz2.txt
Teclee el Numero de columnas: 9
    
```

En seguida solicita el valor del primer elemento de la matriz:

```

C:\MENU.exe
*****
<1> Cambiar Vector.
<2> Cambiar Matriz.
<3> Ejecutar.
<4> Salir.
Opcion: 2
*****
<1> Leer una Matriz Existente <matriz.ext>.
<2> Crear una Nueva Matriz <matriz.new>.
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: matriz2.txt
Teclee el Numero de columnas: 9
Ingresa los Valores de la Matriz
Matriz[1][1]= _
    
```


c) *Introducir uno a uno los valores de cada elemento de la matriz*

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: matriz2.txt
Teclee el Numero de columnas: 9
Ingresa los Valores de la Matriz
Matriz[1][1]= 0
Matriz[1][2]= -1
Matriz[1][3]= -1
    
```

Una vez terminada la matriz se despliega nuevamente el menú principal del programa.

```

C:\MENU.exe
Matriz[9][1]= 0
Matriz[9][2]= 0
Matriz[9][3]= 0
Matriz[9][4]= -1
Matriz[9][5]= -1
Matriz[9][6]= -1
Matriz[9][7]= -1
Matriz[9][8]= 1
Matriz[9][9]= 0
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
    
```

4) Elegir la opción 1 para indicar el vector de entrada a utilizar.

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Tecllea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1_
    
```

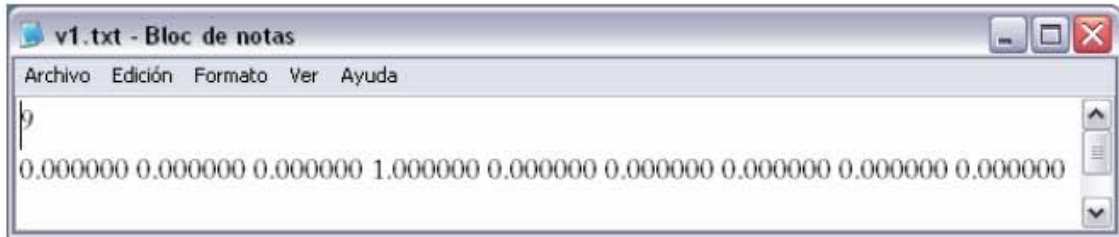
Como respuesta, se despliega el menú correspondiente a la opción 1:

```

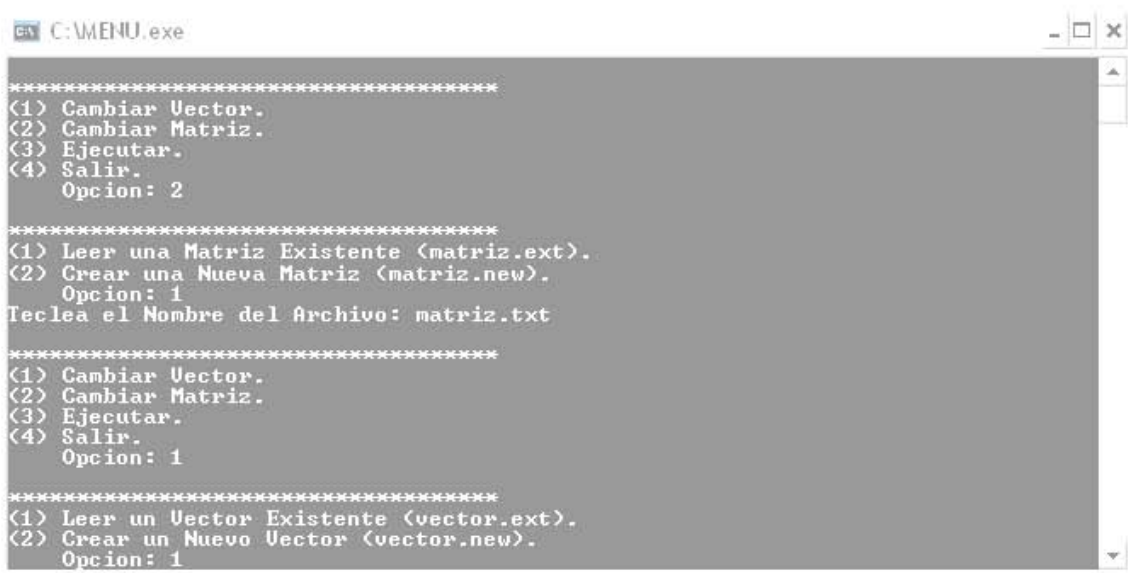
C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Tecllea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: _
    
```

Ahora el cursor se encuentra a la espera de la opción a elegir ya sea leer un vector existente o crear un nuevo vector, en ambas opciones se indica el formato del nombre del archivo entre paréntesis (*nombre.ext*)

En nuestro caso ya tenemos creado un archivo con un vector de entrada (contiene el valor del estado correspondiente a cada uno de los nodos y corresponde a uno de los escenarios de prueba propuestos para la evaluación):



5) Elegir la opción 1:



En seguida solicita el nombre del archivo que contiene al vector:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: _
    
```

Teclee el nombre del archivo (por ejemplo v1.txt):

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt
    
```

Se despliega nuevamente el menú principal:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion:
  
```

En caso de querer generar el vector directamente con el programa elegir la opción 2:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 2
  
```

Se solicita el nombre del vector que se desea crear:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo:
    
```

a) Teclear el nombre con el que se desea identificar al vector:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt
    
```

Posteriormente, solicita el número de columnas del nuevo vector:

```

C:\MENU.exe
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1

*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt
Teclee el Numero de columnas:
    
```

b) Teclear el número de columnas (por ejemplo el número de nodos de uno de los mapas desarrollados a lo largo de la metodología en la Sección 5.6.2)

```

C:\MENU.exe
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 1

*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt
Teclee el Numero de columnas: 9_
    
```

Solicita el valor del primer elemento del nuevo vector:

```

C:\MENU.exe
(4) Salir.
   Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
   Opcion: 1
Tecllea el Nombre del Archivo: matriz.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
   Opcion: 1

*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
   Opcion: 2
Tecllea el Nombre del Archivo: v1.txt

Tecllee el Numero de columnas: 9
Ingresa los Valores del Vector
Vector[1][1]=

```

c) Introducir uno a uno los valores de cada elemento del vector (ver escenarios de prueba propuestos)

```

C:\MENU.exe
   Opcion: 2

*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
   Opcion: 1
Tecllea el Nombre del Archivo: matriz.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
   Opcion: 1

*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
   Opcion: 2
Tecllea el Nombre del Archivo: v1.txt

Tecllee el Numero de columnas: 9
Ingresa los Valores del Vector
Vector[1][1]= 0
Vector[1][2]= 0

```


Una vez terminado el vector, se despliega, nuevamente, el menú principal del programa.

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
    Opcion: 2
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt

Teclee el Numero de columnas: 9
Ingresa los Valores del Vector
Vector[1][1]= 0
Vector[1][2]= 0
Vector[1][3]= 0
Vector[1][4]= 1
Vector[1][5]= 0
Vector[1][6]= 0
Vector[1][7]= 0
Vector[1][8]= 0
Vector[1][9]= 0

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
    Opcion: 3
    
```

6) Elegir la opción 3 para entrar al menú de ejecución:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Leer una Matriz Existente (matriz.ext).
(2) Crear una Nueva Matriz (matriz.new).
    Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: matriz.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
    Opcion: 1

*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
    Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
    Opcion: 3
    
```

En seguida se despliega el menú correspondiente:

```

C:\> C:\MENU.exe
(4) Salir.
Opcion: 1

*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 3

*****
Tipo de Funcion a Utilizar.

*****
(1) Binomial.
(2) Trinomial.
(3) Logistica.
(4) Regresar.
Opcion:
    
```

El cursor espera la opción de la función umbral elegida.

7) Elegir la opción 3 (en la sección 3.2.2 se indica la razón de elegir esta función)

```

C:\> C:\MENU.exe
(4) Salir.
Opcion: 1

*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 3

*****
Tipo de Funcion a Utilizar.

*****
(1) Binomial.
(2) Trinomial.
(3) Logistica.
(4) Regresar.
Opcion: 3
    
```

En este punto pregunta si se desean guardar los resultados:

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
    Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
    Opcion: 3
*****
Tipo de Funcion a Utilizar.
*****
(1) Binomial.
(2) Trinomial.
(3) Logistica.
(4) Regresar.
    Opcion: 3
Guardar Resultados(s/n)...
Guardar Resultados(s/n)...
    
```

8) Teclar s para guardar los resultados para consultas y análisis posteriores.

En caso de no desear guardar los resultados, teclee n y pase al punto 10).

```

C:\MENU.exe
*****
(1) Leer un Vector Existente (vector.ext).
(2) Crear un Nuevo Vector (vector.new).
    Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
    Opcion: 3
*****
Tipo de Funcion a Utilizar.
*****
(1) Binomial.
(2) Trinomial.
(3) Logistica.
(4) Regresar.
    Opcion: 3
Guardar Resultados(s/n)...
Guardar Resultados(s/n)... s
    
```

Ahora se despliega la petición del nombre del archivo en el que se desea guardar los resultados.

```

c:\ C:\MENU.exe
(1) Leer un Vector Existente <vector.ext>.
(2) Crear un Nuevo Vector <vector.new>.
Opcion: 1
Teclea el Nombre del Archivo: v1.txt

*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion: 3

*****
Tipo de Funcion a Utilizar.

*****
(1) Binomial.
(2) Trinomial.
(3) Logistica.
(4) Regresar.
Opcion: 3

Guardar Resultados(s/n)...
Guardar Resultados(s/n)... s
Teclea el Nombre del Archivo:
    
```

9) Teclear el nombre del archivo de resultados.

10) En seguida se despliegan los valores de cada uno de los nodos, independientemente si se eligió guardar o no los resultados. Cada uno de los vectores corresponde al estado obtenido en una iteración:

```

c:\ C:\MENU.exe
Vector[0]= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.0000
00 0.000000
Vector[1]= 0.500000 0.500000 0.006693 0.500000 0.993307 0.993307 0.006693 0.5000
00 0.006693
Vector[2]= 0.000045 0.006474 0.006693 0.999946 0.992847 0.999389 0.000553 0.0071
53 0.000047
Vector[3]= 0.006269 0.482643 0.006716 0.999951 0.999954 0.999953 0.000046 0.5002
75 0.000000
Vector[4]= 0.000048 0.071339 0.007083 0.999953 0.999953 0.999955 0.000045 0.0823
39 0.000004
Vector[5]= 0.003008 0.389991 0.007069 0.999953 0.999955 0.999955 0.000045 0.4203
10 0.000000
Vector[6]= 0.000113 0.104151 0.007666 0.999953 0.999954 0.999955 0.000045 0.1267
90 0.000003
Vector[7]= 0.002040 0.337860 0.007487 0.999953 0.999955 0.999955 0.000045 0.3815
50 0.000001
Vector[8]= 0.000170 0.123968 0.008232 0.999953 0.999954 0.999955 0.000045 0.1594
85 0.000002
Vector[9]= 0.001565 0.301646 0.007978 0.999953 0.999955 0.999955 0.000045 0.3590
34 0.000001
Vector[10]= 0.000238 0.136710 0.008831 0.999953 0.999954 0.999955 0.000045 0.186
008 0.000002
Vector[11]= 0.001283 0.273809 0.008540 0.999953 0.999955 0.999955 0.000045 0.345
116 0.000001
Vector[12]= 0.000292 0.144960 0.009474 0.999953 0.999954 0.999955 0.000045 0.200
    
```

En seguida regresa, nuevamente, al menú principal.

```

c:\Familia\marthis\tesis\HPCS\PruebaEnCurso\MENU.exe
Vector= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
Vector= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
0.000000 0.000000 1.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
Vector= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
Vector= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
Vector= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000
0.000000 0.000000 1.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
Vector= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
Vector= 0.000000 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 1.000000 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
*****
(1) Cambiar Vector.
(2) Cambiar Matriz.
(3) Ejecutar.
(4) Salir.
Opcion:
    
```

11) Si desea continuar realizando pruebas con la misma matriz, utilizando diferentes vectores, continúe a partir del punto 4). Si desea realizar pruebas con matrices distintas inicie desde el punto 2).

Para salir del programa, elija la opción 4: La pantalla se cierra en seguida como resultado de esta opción.

Basados en el programa de evaluación se creó un programa con el propósito específico de interpretar los valores obtenidos.

```
C:\MENU.exe
Vector[30]= 0.000516 0.141263 0.017143 0.999951 0.999954 0.999955 0.000045 0.334
485 0.000002

Como resultado del escenario:
El Nivel de Agua en la Vasija se encuentra dentro del rango normal de operación
La Presión en la Vasija se encuentra dentro del rango normal de operación
La Potencia del Reactor se encuentra dentro del rango normal de operación
La Temperatura de la Alberca de Supresión se encuentra FUERA DEL RANGO NORMAL DE
OPERACIEN
La Temperatura del Pozo Seco se encuentra FUERA DEL RANGO NORMAL DE OPERACIEN
La Presión de la Contención Primaria se encuentra FUERA DEL RANGO NORMAL DE OPER
ACIEN
El Nivel de Agua en la Alberca de Supresión se encuentra dentro del rango normal
de operación
El Reactor se encuentra VULNERABLE O EN MAL ESTADO
La Contención Primaria se encuentra VULNERABLE O EN MAL ESTADO

*****
```