

01170
2ej. 3

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA AL
CONTROL DE SISTEMAS ELECTRICOS

Armando Frausto Solís

TESIS

Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA
de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA
(ELECTRICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA

México, D. F.

1987

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

R E S U M E N

Este trabajo trata sobre la aplicación de sistemas de inteligencia artificial, principalmente la rama de los expertos, en la operación de los sistemas eléctricos.

Una parte del trabajo se dedica a revisar los conceptos básicos de la inteligencia artificial.

Las funciones primarias de interés, aplicadas a los centros de control son: el procesamiento de alarmas, la restauración de los sistemas eléctricos de potencia/distribución y el entrenamiento de operadores.

Para fundamentar una de las aplicaciones de inteligencia artificial, en la operación de los sistemas eléctricos, se lleva a cabo un análisis de la información presentada por un sistema de control remoto y adquisición de datos a los operadores de un centro de control moderno, detectando varios factores indeseables graves, en especial en condiciones de disturbio. Por esta razón, se propone el manejo de alarmas en los centros de control mediante un experto basado en el conocimiento, con lo que se eliminan los factores indeseables.

Se tratan también los expertos de restauración del sistema eléctrico y otros sistemas de este tipo relacionados con la seguridad/calidad. Se inicia un catálogo de sistemas expertos, que puede normar las aplicaciones orientadas a la operación de un sistema eléctrico.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL
APLICADA AL
CONTROL DE SISTEMAS
ELECTRICOS

C O N T E N I D O

1. INTRODUCCION	1
2. CONCEPTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. SISTEMAS EXPERTOS	7
2.1 Inteligencia artificial	7
2.1.1 Inteligencia artificial pura.	8
2.1.2 La prueba de Turing.	12
2.1.3 Inteligencia artificial aplicada.	13
2.2 Métodos de solución en inteligencia artificial	16
2.2.1 Sistemas de producción.	17
2.2.2 Estrategias de control.	19
2.3 Sistemas expertos	21
2.3.1 Sistemas del conocimiento.	21
2.3.2 Técnicas de los sistemas del conocimiento.	26
2.3.3 Reglas de los sistemas del conocimiento.	30

3. EXPERTOS EN EL CONTROL DEL SISTEMA ELECTRICO	35
3.1 Expertos en funciones primarias de centros de control	35
3.1.1 Experto de alarmas.	36
3.1.1.1 Análisis de información de alarmas/ eventos de un sistema de control.	38
3.1.1.2 Solución del problema.	44
3.1.1.3 Experto comercial prototipo.	52
3.1.1.4 Estructura del experto.	54
3.1.1.5 Interfaz hombre-máquina.	55
3.1.1.6 Experto distribuido.	56
3.1.2 Experto en la restauración del sistema eléctrico de potencia.	65
3.1.3 Experto en la restauración del sistema de distribución de energía.	66
3.1.4 Experto de entrenamiento.	69

3.2 Expertos de control de tensión y potencia reactiva.	69
3.2.1 Operación guiada basada en el conocimiento.	71
3.2.1.1 Características del método.	71
3.2.1.2 Estrategia de control.	75
3.2.1.3 Algoritmo.	76
3.2.1.4 Control de los estados de transición.	77
3.2.1.5 Diagrama de transición de estados.	78
3.2.2 Experto de asistencia en la toma de decisiones.	79
3.2.2.1 Características del método.	79
3.2.2.2. Reglas de producción.	82
3.3 Seguridad del sistema eléctrico de potencia.	85
3.3.1 Predicción de contingencias.	86
3.3.1.1 Identificación de variables características.	87
3.3.1.2 Base de datos de estudios.	87
3.3.1.3 Reconocimiento de patrones.	88
3.3.1.4 Predicción del estado postdisturbio.	89

4. CONTROL EN TIEMPO REAL DEL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL	92
4.1 Control del sistema interconectado nacional.	92
4.1.1 Centro nacional de control.	93
4.1.2 Sistemas de control de área.	99
4.2 Catálogo de sistemas expertos para el sector eléctrico.	104
4.3 Integración de sistemas expertos en los centros de control.	108
4.3.1 Procesamiento de alarmas.	108
4.3.2 Otros sistemas expertos.	110
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
6. APENDICE	121
6.1 Nomenclatura	121
7. REFERENCIAS	123

1. INTRODUCCION

El concepto de inteligencia artificial (IA) se originó hace más de tres décadas con la meta básica de imitar los procesos mentales por medios computacionales. Los avances logrados a la fecha, desde el punto de vista de una imitación mental, han sido realmente pobres. Esto se debe a limitaciones de las computadoras disponibles y a que el conocimiento de la mecánica de los procesos mentales es aun incipiente. En la actualidad se trabaja arduamente para profundizar en el conocimiento de los procesos mentales basicos y se espera que con las maquinas de la quinta generación se superen los problemas criticos de las actuales (rapidez y capacidad de almacenamiento para estas aplicaciones). Para el año 2020 se pronostica la existencia de sistemas increíbles, hoy catalogados como ciencia ficción. Como ejemplos pueden citarse el reconocimiento de voz fluida, los robots autónomos y las máquinas que aprenden y se programan por ellas mismas.

Desde luego que las computadoras han evolucionado tremendamente, de hecho esta década presenta la explosión tecnológica de la computación. Por lo mismo, podría dudarse en la existencia de los problemas mencionados para lograr las aplicaciones de la IA; sin embargo, al adentrarse en el contenido del capítulo 2 (segunda parte), se comprende que la IA pura debe considerarse por lo pronto sin aplicación práctica.

Tanto tiempo de investigación ha dado sus frutos. Las técnicas obtenidas, los métodos de solución de problemas y el avance de la computación han dado origen, también en esta década, a la IA aplicada contribuyendo con sistemas de aplicación práctica muy valiosos.

Según el enfoque anterior, el concepto de inteligencia artificial puede definirse así:

"Sistema de programación, que permite que las máquinas tengan la habilidad de discernir y tomar decisiones en base a información incompleta".

La IA puede dividirse en tres ramas: (a) sistemas expertos (SE), (b) robótica y (c) procesamiento natural del lenguaje.

(a). Sistemas expertos (SE). Esta área de la IA es la rama de interés primaria del trabajo; a su vez se encuentra subdivida en:

a.1 Sistemas del conocimiento. Son por el momento de aplicación única, requieren de una base de conocimientos orientada para una sola tarea y su evolución en lo que resta del siglo será:

a.1.1 Sistemas del conocimiento de funciones múltiples.

a.1.2 Sistemas del conocimiento de aplicación general. Requerirán redes de conocimientos y generarán bibliotecas activas para la ayuda de usuarios.

a.2 Terminales inteligentes. Su función es la colección de información con interpretación experta de datos.

(b). Robótica. Incluye el procesamiento de imágenes y manejo de robots.

(c). Procesamiento natural del lenguaje. Incluye el reconocimiento de las formas escritas del lenguaje.

Algunos SE son de importancia muy relevante en distintos campos de aplicación. El diagnóstico médico fue la primera actividad que se consideró especialmente adecuada. MYCIN², por ejemplo, ha dado resultados sorprendentes ya que sus prescripciones son tan acertadas como las obtenidas de los mejores especialistas. El éxito logrado con MYCIN ha generado un gran interés en los SE, fomentando la búsqueda de aplicaciones en otros campos.

Los sistemas expertos son muy recientes; se dice que hace unos cuatro años los únicos que sabían de éstos eran los especialistas interesados¹⁰. Sin embargo, súbitamente se despertó una gran inquietud y aun cuando algunos no querían creer en ellos, otros se maravillaban ante los programas que razonan como expertos y que demuestran una cierta inteligencia, artificial, es cierto, pero que es copiada de los humanos expertos, de quienes se recopilan sus conocimientos que se aprovechan para resolver problemas considerados difíciles. Actualmente, la industria se está apoderando de la materia, con aportaciones importantes a través de este valioso instrumento que potencializa la sabiduría humana. No obstante, esta sabiduría no se deja capturar y modelar fácilmente en todas las circunstancias, por lo que debe efectuarse una selección entre las aplicaciones realistas a corto plazo, desechando otras que deberán esperar.

Los sistemas del conocimiento tratan de simular el comportamiento de un experto humano y entre sus aplicaciones exitosas figuran:

- Diagnóstico médico.
- Configuración de computadoras y entrenamiento.
- Exploración minera.
- Interpretación de estructuras moleculares.
- Toma de decisiones financieras.
- Operación de sistemas eléctricos.

El conocimiento de los expertos se expresan en un conjunto de reglas, formando una base de conocimientos. Estas reglas son conocidas como reglas de producción y si cierta situación se presenta, una determinada acción se realiza. Su uso caracteriza las respuestas lógicas o semilógicas que se presentan cotidianamente en el comportamiento humano.

Para desarrollar un sistema de IA se emplean herramientas que facilitan la captura del conocimiento de los expertos y crean la base de conocimientos. A ésta se adicionan nuevas reglas, las que se validan simulando la operación real del sistema. La programación simbólica¹ como LISP y PROLOG, son lenguajes de propósito general ampliamente utilizados en el desarrollo de los sistemas de IA.

Existe un conjunto importante de lenguajes de representación general desarrollados especialmente para la ingeniería del conocimiento, con el objetivo fundamental de facilitar la implantación de un amplia gama de problemas, e.g. OPS5².

Recientemente, la facilidad de desarrollo de los sistemas expertos se ha incrementado considerablemente. Esto se debe a la disponibilidad y mejoras introducidas en las herramientas de construcción comerciales que se ofrecen ("shells"), que son el producto de la investigación de los grupos de IA de las universidades y otras organizaciones en este campo.

La segunda parte de este trabajo incluye los fundamentos de la IA y la metodología requerida para su aplicación en la solución de problemas.

Los centros de control modernos empleados en la operación de las redes eléctricas, requieren estructuras de control sofisticadas, para cumplir el objetivo fundamental de operar con seguridad y economía. A fin de lograr el objetivo planteado, en necesario contar con información voluminosa sujetándola a

tiempos muy cortos de adquisición.

No obstante la magnífica evolución de los sistemas de control, surge la duda si la información presentada a los operadores de estos centros es adecuada.

Como una contribución importante, en la tercera parte del trabajo, se realiza un análisis sobre la presentación de alarmas y eventos a los operadores de un centro de control, identificando un gran número de factores indeseables. El problema más grave detectado es un fenómeno denominado sobrecarga informativa, que se presenta en condiciones de disturbios, creando situaciones de confusión, acrecentando los posibles estados de nerviosismo natural del personal.

Las técnicas de IA aplicadas a la operación de sistemas eléctricos es un campo relativamente nuevo. A la fecha se han reportado una serie de trabajos que prometen dotar a los operadores de los centros de control con herramientas muy poderosas y lo que es más importante, congruentes con su lógica de toma de decisiones.

La problemática del procesamiento tradicional de las alarmas en los centros de control motivó la incursión en el área de la IA, buscando la posibilidad de resolver el problema a través de esta herramienta. Se propone entonces un sistema experto para el manejo de alarmas en los centros de control. Se diseñan un conjunto de reglas de producción que eliminan los defectos del manejo de alarmas y se sugiere la estructura del sistema y las vistas de la interfaz hombre-máquina. Lo anterior se encuentra contenido en la misma tercera parte del trabajo.

Asimismo, se tratan algunos otros SE útiles en la operación de las redes eléctricas; se cubren las áreas de:

- Restauración del sistema eléctrico,
- entrenamiento de operadores,
- control de tensión y potencia reactiva,
- asistencia en la toma de decisiones y
- seguridad del sistema de potencia.

El sistema eléctrico interconectado nacional está formado por seis áreas y está equipado con un importante sistema de control jerárquico, constituido por un centro coordinador y seis centros de control de área.

La cuarta parte del trabajo trata, en forma condensada, sobre las estructuras de control del sistema interconectado nacional y sus funciones, a nivel coordinación y a nivel de áreas.

Se tratan también las posibilidades de integración de algunos sistemas de IA en las estructuras de control mencionadas. Se inicia un catálogo de sistemas expertos, aplicable a la operación de redes eléctricas. Se fundamenta mediante un análisis el sistema prioritario para el sector eléctrico.

No es aventurado establecer que la inteligencia artificial y sus diversas áreas: sistemas expertos, robótica, procesamiento natural del lenguaje, etc., son hoy en día el campo más novedoso de la computación. La gran importancia que ésta ha adquirido se debe a que se tienen disponibles soluciones de problemas difíciles que requieren aprovechar el conocimiento e inteligencia del humano, dando resultados congruentes con la lógica empleada en el proceso de la toma de decisiones.

2. CONCEPTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. SISTEMAS EXPERTOS.

2.1 Inteligencia artificial.

El concepto de inteligencia artificial aparece hace unos 30 años y durante dos décadas sus logros se valían como investigación pura. Dos factores impactan su casi nula aplicación práctica: las metas perseguidas y la tecnología en computación disponible. Sin embargo, hace una década las condiciones cambian y surge la era de la inteligencia artificial aplicada, con valor comercial muy importante. Es conveniente tener presentes ambos enfoques.

La base de investigación de este apasionante tema viene a ser lo que Newell y Simon llaman la hipótesis del sistema de símbolos físicos²:

"El sistema de símbolos físicos consiste en un conjunto de entidades, llamados símbolos, los cuales son patrones físicos que pueden ocurrir como componentes de otra entidad llamada expresión (o estructura simbólica)".

"Una estructura simbólica está compuesta de un número de símbolos relacionados en alguna forma física. Las estructuras simbólicas evolucionan para formar un sistema, el cual contiene un conjunto de procesos que operan sobre las expresiones para producir otras más; procesos de creación, modificación, reproducción y eliminación. Un sistema de símbolos físicos es una máquina que produce con el tiempo un conjunto evolutivo de estructuras simbólicas. Un sistema como este existe en un mundo de objetos más amplio que las mismas expresiones simbólicas"

Hipótesis del sistema simbólico físico." Un sistema simbólico

físico tiene los medios necesarios y suficientes para generar acciones inteligentes". Podría encontrarse a través de una validación empírica que la hipótesis es cierta o falsa, pero lo interesante es que la experimentación requerida es un campo ideal para emplear una computadora que puede simular cualquier sistema simbólico físico. Posiblemente, algunos aspectos de la inteligencia humana podrán modelarse mediante estos sistemas y otros no, pero lo significativo del asunto es que parece ser posible construir sistemas de programación que ejecuten tareas realizadas, por el momento, únicamente por el hombre.

2.1.1. Inteligencia artificial pura

La inteligencia artificial (IA), en su concepción más pura de investigación fué planteada como la imitación de los procesos de la inteligencia humana electrónicamente. Por inteligencia se entiende: (1) facultad de conocer o de entender, (2) aprender de la experiencia, (3) razonar y (4) responder a nuevas situaciones. Los sistemas de IA están muy lejos de lograr el objetivo original y solamente algunos satisfacen la característica de la inteligencia de responder a nuevas situaciones.

Lograr imitar computacionalmente los procesos mentales es una tarea muy difícil y algunos lo consideran como un mito. En efecto, las computadoras y los humanos son totalmente distintos. Para empezar, las máquinas fueron concebidas con lógica contraria a la del humano¹¹, lo cual se manifiesta al examinar algunas características distintivas de ambos sistemas:

A. Características humanas.

(1) Captación a través de sus sentidos de cantidades tremendas

de elementos de información, transmitirlos a velocidades inigualables al cerebro, utilizarlos en un proceso orientado básicamente a la toma de decisiones y almacenar sólo lo necesario,

- (2) si requiere información, generalmente la memoria está donde y cuando se necesita, no es preciso usar procesos de búsqueda y organización,
- (3) todos sus sentidos pueden trabajar en paralelo, caracterizando los elementos de información con los atributos necesarios,
- (4) su memoria es considerada de capacidad infinita,
- (5) su capacidad de salida es muy limitada en velocidad y cantidad, pero esto no es grave, ya que su estructura así lo requiere,
- (6) su capacidad de cómputo numérico es demasiado limitada,
- (7) con excepción de la respiración y la circulación su lógica no está preprogramada totalmente y varias acciones se realizan a "voluntad" y
- (8) razona y aprende de situaciones pasadas.

B. Características de computadoras.

- (1) Capacidad de entrada limitada y utiliza una arquitectura básicamente orientada para el procesamiento de datos (PD).
- (2) si requiere información, es preciso usar procesos de búsqueda y organización complejos,

- (3) sus canales de entrada trabajan uno a la vez, si los elementos de información se deben caracterizar con atributos de varias fuentes, se requieren de bases de datos (BD) y la captura de información es lenta,
- (4) su capacidad de memoria es relativamente limitada,
- (5) su capacidad de salida de información es muy poderosa.
- (6) su capacidad de cómputo numérico es extremadamente elevada,
- (7) ninguna máquina tiene voluntad, son autómatas cuyas acciones dependen exclusivamente de la lógica, generalmente secuencial de un programa y
- (8) No razonan ni aprenden.

Fensar en imitar los procesos de la mente, después de repasar los puntos comparativos resultaría aberrante. Sin embargo, si se hace con un sentido filosófico no lo es tanto, ya que " lo que hoy nos parece imposible se hará con el tiempo". Entonces, lograr las metas de la IA pura es un reto para la ciencia, de lo más motivante y enigmático, pero al mismo tiempo tal vez peligroso, ¿podría el hombre dirigirse ahora hacia una "contaminación intelectual del hombre mismo" al crear máquinas inteligentes?. Por el momento, esto es sólo ficción, pero los científicos trabajan arduamente, quieren decifrar los procesos de la mente; la vista, el entendimiento del lenguaje, y han creado la ciencia "cognitiva"¹¹, que es la "habilidad de las computadoras de actuar como humanos".

Las diferencias entre los sistemas comparados son naturalmente comprensibles y lógicas; por un lado el humano con una estructura celular, es el resultado de millones de mutaciones; tiene una indecifrable facilidad de aprender del cambiante

mundo real, que el mismo altera en cierta forma. Hereda un fuerte deseo de aprender y transformar; está dotado de células altamente especializadas llamadas genes, encargadas de transmitir de una generación a otra la carga de información con las características físicas e intelectuales del individuo. También, se ha preocupado desde hace ya miles de años en buscar métodos de almacenar y transmitir sus conocimientos; usa un lenguaje simbólico, que ha evolucionado para satisfacer los volúmenes y facilidad de captación de información. Debido a su pobre capacidad de procesamiento numérico creó las computadoras y las ciencias de soporte requeridas, orientándolas básicamente al procesamiento de datos (PD).

A las computadoras se les ha evolucionado tremendamente, su potencialidad en rapidez, capacidad de memoria y otros parámetros cuantitativos así lo demuestran. Su manejo de información ha ido desde la representación numérica a la de cadenas de caracteres y recientemente manejan símbolos con significado abstracto.

Sin embargo, las computadoras disponibles no son aun adecuadas para desarrollar la IA con el objetivo puro planteado, ni en capacidad ni en arquitectura y transcurrirán varios años más para tener máquinas con las características idóneas requeridas. Las máquinas de la quinta generación³ ayudarán definitivamente. Por el momento, con las actuales se han tenido resultados no muy exitosos. En una comparación realizada¹¹ para una supercomputadora construida por Cray Research, Control Data e IBM queda de manifiesto que esta gran máquina tiene la capacidad de cómputo de una abeja; para obtener la capacidad de un chimpancé habrá que aumentarla por un factor de 10^4 y para la del humano se debe adicionar aun más la capacidad usando otro factor igual o mayor. Al inicio del siglo XXI posiblemente se tenga el poder de máquina requerido por la IA pura, pero es muy dudoso que se adquiera para entonces el conocimiento suficientemente sólido de los procesos mentales, para esperar con

el siglo sistemas de computación que cumplan los objetivos de la IA pura, e imitar los procesos mentales del hombre. Sin embargo, algunos años después el hombre realizará, sin duda, este "peligroso sueño".

Lo anteriormente expuesto no quiere decir que la IA sea un fracaso, lo que pasa es que hay en realidad dos conceptos, uno enmarcado en la idea de IA pura y el otro en un aspecto de aplicación práctico, que con un natural cambio de enfoque ha introducido al mercado, sistemas poderosos y de aplicación importante en diversos campos.

2.1.2 La prueba de Turing.

La idea de duplicar la actuación humana fué propuesta por Alan Turing*. Para eliminar lo subjetivo de la cuestión de si las máquinas podrían pensar, propuso una norma que evaluará los sistemas de IA, la que se conoce como la prueba de Turing. Como se ilustra en la figura 2-1, una terminal de entrada/salida se conecta a una computadora y otra le da acceso a un hombre. Otra persona teclea interrogantes en ambas terminales y si no puede distinguir entre las respuestas del humano y de la máquina el sistema habrá pasado la prueba como un sistema de IA.

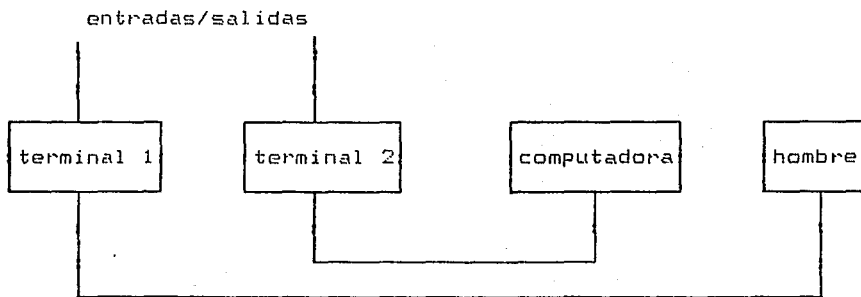


Figura 2-1. Prueba de Turing para evaluar sistemas de IA.

2.1.3 La inteligencia artificial aplicada.

La IA planteada con este nuevo enfoque no tiene en realidad una definición específica y se enuncia de diversas maneras:

--"Es una forma moderna de desarrollar los sistemas de programación, que promete obtener nuevas aplicaciones computacionales, permitiendo que las máquinas tengan la habilidad de discernir y tomar decisiones aun con información incompleta; conjuntando metas, métodos y herramientas que conducen a lograr una colección de programas que saben lo suficiente para aconsejar a un experto en algún campo limitado¹¹".

--"IA es algo de lo siguiente:

+ Cualquier aplicación que exhiba algo que la mayoría de la gente pueda denominar inteligencia.

+ El estudio de como emular algún comportamiento humano con una computadora¹²".

--"IA es el estudio de como hacer computadoras que realicen tareas que, por el momento, la gente hace mejor²".

Es más claro en lugar de tratar de establecer una definición, plantear los campos de aplicación que han sido incluidos en la IA. La figura 2-2 ilustra diversas ramas que surgen de la IA aplicada. Se han fijado en el tiempo las aplicaciones y las evoluciones de los sistemas expertos¹³, por ser el área de interés de este trabajo. Como puede apreciarse la IA se ve ahora constituida por los siguientes dominios de acción:

a. Sistemas expertos.

a.1 Sistemas del conocimiento (SC). Son por el momento de aplicación única, requieren de una base de conocimientos (BC) orientada para una sólo tarea y su evolución en lo que resta del siglo será:

a.1.1 Sistemas del conocimiento de funciones múltiples. Requerirán una BC heterogénea.

a.1.2 Sistemas del conocimiento de aplicación general. Requerirán redes de conocimientos (RC) y generarán bibliotecas activas para la ayuda de usuarios.

a.2 Terminales inteligentes (TI). Su función es la colección de información con interpretación experta de datos.

b. Robótica. Incluye el procesamiento de imágenes y manejo de robots.

c. Procesamiento natural del lenguaje (PNL). Incluye el reconocimiento de las formas escritas del lenguaje.

Cabe mencionar, que aún cuando se dedican esfuerzos muy importantes en el área de la percepción, no hay aun éxitos significativos. Las señales deben caracterizarse con una gran diversidad de atributos, algunos requieren captura simultánea, y el ruido presente con las señales nativas es fuerte. Se incluyen en este campo la voz y la visión. En el caso de la voz, por ejemplo, todas las personas producen acústica muy diferente; además, entender frases completas es un proceso muy complejo, por lo que sólo se tienen sistemas que manejan palabras sueltas. Esta área es de suma importancia para crear robots inteligentes, capaces de conducirse con cierta autonomía.

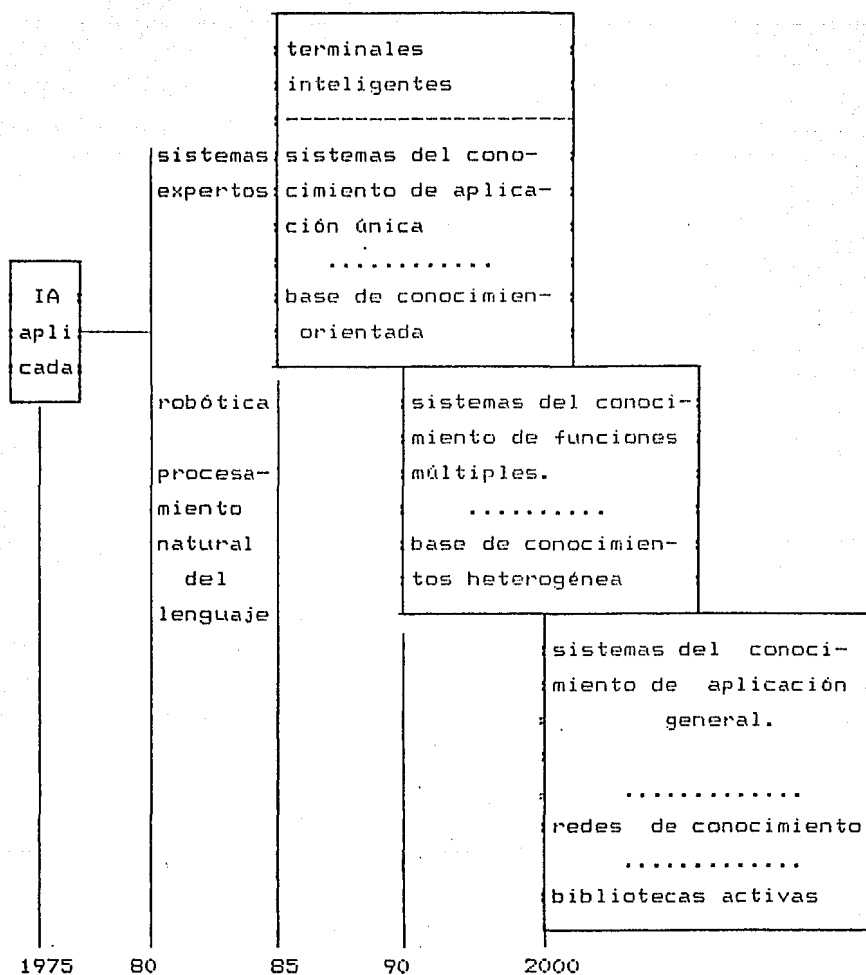


Figura 2-2 Ramas de IA aplicada y evolución de sistemas expertos.

2.2 Métodos de solución en inteligencia artificial

Los pasos principales para construir un sistema para resolver un problema de IA son:

1. Definición del problema. Incluir especificaciones precisas de las situaciones iniciales y la situación final que soluciona el problema.
2. Análisis del problema. Distinguir las características importantes para poder decidir las técnicas adecuadas de solución del problema.
3. Técnica de solución. Seleccionar la mejor técnica de acuerdo a las características del problema particular.

El problema se define como un espacio de búsquedas de estados. Para proporcionar una descripción formal es necesario:

- Definir el espacio de estados que contenga todas las configuraciones posibles de las situaciones relevantes. No es necesario definir explícitamente todos los estados que contenga el espacio.
- Definir los estados iniciales.
- Definir los estados objetivos aceptables.
- Especificar el conjunto de reglas que describan las acciones requeridas.

Al analizar el problema, es necesario identificar si presenta las características:

- Seccionable. Se puede descomponer en un conjunto de proble-

mas más simples.

- Ignorable. Algunos pasos de solución pueden ser ignorados.
- Recuperable. Los pasos de solución pueden rehacerse.
- Predecible. Para cada acción que se realice en su espacio, se sabe lo que sucederá; por consiguiente se pueden planear secuencias completas de acciones conociendo su estado final.
- Tolerable. Una buena solución se acepta como objetivo, sin compararla con todas las otras posibles.
- Consistente. Las BD son consistentes.
- Interactivo. La solución del problema será interactiva con un usuario final.

EL problema puede ser resuelto aplicando una estrategia de control sobre el conjunto de reglas. Para lograrlo se establece un proceso de búsquedas, hasta lograr un estado objetivo.

2.2.1 Sistemas de producción.

Los sistemas de producción proporcionan las estructuras requeridas por los procesos de búsquedas. Consisten de:

- Un conjunto de reglas, cada una formada por una parte izquierda con un patrón que determina una serie de condiciones y una parte derecha que especifica la acción que se debe efectuar si se cumplen las condiciones.
- Una o más BD, incluyendo la información de la tarea particular. Algunas partes de la BD pueden ser permanentes y

otras ser parte de la solución del problema.

- Una estrategia de control que especifica el orden en que serán comparadas las reglas, y las formas de actuar en caso de que se presenten conflictos al comparar las reglas.

Los sistemas de producción ofrecen una metodología formal para la creación de modelos de IA, a partir de una diversidad de técnicas de solución, logrando sistemas que continúan funcionando aun con modificaciones en la BD.

Las clases de sistemas de producción son:

- Monótono. La aplicación de una regla no impide la aplicación posterior de otra regla que pudiera también haberse seleccionado, en lugar de esa elegida.

- Parcialmente conmutativo. Si la aplicación de una secuencia particular de reglas transforma el estado X al Y, cualquier permutación permitida en la secuencia produce la misma transformación.

- Conmutativo. Es un sistema monótono y parcialmente conmutativo.

Hacer estas distinciones es importante. En efecto, recurriendo al sentido práctico, es factible relacionar las características de los problemas con las clases de sistemas de producción².

Por ejemplo, los ignorables pueden resolverse mediante un sistema de producción conmutativo, los que funcionan eficientemente en casos donde el proceso crea situaciones nuevas, en vez de actualizar cosas pasadas.

2.2.2 Estrategias de control.

Los requisitos fundamentales de una estrategia de control son:

- Que cause avance. Las estrategias que no causan avance nunca producen una solución.
- Que sea sistemática. Se distinguen:
 - + Búsqueda de anchura. Consiste en construir un árbol, con el estado inicial como raíz. Generar todas las ramas usando cada una de las reglas aplicables al estado inicial. Después, para cada nodo generar sus otros ramales de acuerdo con las reglas procedentes. Continuar el proceso hasta que eventualmente alguna regla genere el estado objetivo.
 - + Búsqueda de profundidad. Es una variante de la anterior. En ésta se explora una sola rama hasta lograr la solución o se encuentra algún fondo preconsiderado y sólo entonces se regresa a buscar por otras ramas.

Para resolver problemas de aplicación práctica, los cuales son difíciles, es necesario mantener el compromiso de movilidad y sistematicidad; pero también construir una estructura de control que logre una muy buena solución aun cuando no sea la mejor. Para esto se usa la heurística, una técnica que mejora la eficiencia de los procesos de búsquedas.

Los procesos descritos definen una búsqueda en una gráfica completa. Sin embargo, en la práctica esto nunca se hace, ya que podría caerse en el fenómeno llamado explosión combinatorio. En lugar de esto, los programas representan la gráfica implícitamente en las reglas y generan explícitamente sólo las partes que conviene explorar.

Existen dos direcciones que conducen la búsqueda:

- Razonamiento hacia adelante. Se construye un árbol de secuencias de movimiento considerando sólo las ramas con posibilidad de producir la solución. En la raíz se consideran las condiciones iniciales correspondientes. Se genera el siguiente nivel del árbol encontrando todas las reglas cuyos lados izquierdos coincidan con la raíz y se usan los lados derechos para crear las nuevas configuraciones. Se genera el siguiente nivel tomando los nodos del paso previo y se continúa el proceso hasta que se tenga una configuración que cumpla con el estado objetivo.

- Razonamiento hacia atrás. Se construye un árbol, igual que antes, sólo que ahora se empieza con los estados objetivo en la raíz, los niveles subsecuentes se generan haciendo coincidir el lado derecho de las reglas con los nodos y los izquierdos para generar otros nodos y se termina cuando se generen los estados iniciales.

La selección de los dos tipos de razonamiento depende de:

- Tener la raíz de menos estados.

- Tener el menor factor de ramificación. El factor de ramificación es el número promedio de nodos que pueden alcanzarse desde un mismo nodo directamente.

- Buscar que las líneas de razonamiento para las justificaciones al usuario, se obtengan en la forma que se ajuste a la forma de pensar de los mismos.

2.3 Sistemas Expertos.

Los Sistemas expertos (SE) resuelven generalmente tareas que requieren de inteligencia, las cuales por su complejidad deberían ser resueltas con la intervención de un "experto". Para enmarcar debidamente el dominio de aplicación de estos sistemas, se puede decir que existen infinidad de tareas que necesitan del manejo de grandes volúmenes de conocimiento especializado, que la mayoría de las personas no poseen y requieren la intervención de un experto, quien ha adquirido el conocimiento suficiente para lograr una solución aceptable. La gran importancia que ha adquirido este campo de acción se relaciona con el hecho de que los expertos, sobre todo en tareas muy difíciles, no son muchos y en algunas partes ni siquiera existen.

2.3.1 Sistemas del conocimiento.

El conocimiento puede definirse de varias formas, entre otras: (1) la acción de averiguar por el ejercicio de las facultades intelectuales la naturaleza, cualidades y relaciones de las cosas, (2) presumir o conjeturar lo que puede suceder y (3) entender un asunto con facultad legítima para ello. El conocimiento se encuentra en muchas y variadas fuentes, las más completas e importantes, desde luego, son los libros y el hombre mismo. Los libros se agrupan en grandes volúmenes y bibliotecas; almacenando en forma simbólica y pasiva el conocimiento y la experiencia teórica y práctica de toda la humanidad. El hombre, con el paso del tiempo y según sus experiencias podrá ser un "experto", en un campo de acción o dominio determinado, y resolverá los problemas que se le presenten, usando sus propios conocimientos y habilidades, investigando o aprendiendo de las fuentes disponibles --libros, manuales, programas y otros

expertos-. El éxito en la solución del problema, dependerá del nivel de su destreza y de la tecnología disponible.

Entonces, para resolver la gran mayoría de los problemas que se presentan, el conocimiento existe sólo que su uso no es expedito, hay que obtenerlo, interpretarlo y aplicarlo y no es tarea fácil.

La computación convencional efectúa sus procesamientos de acuerdo a la lógica de toma de decisiones secuencial, dirigida por programas organizados tradicionalmente en algoritmos y datos, no contienen realmente una cantidad significativa de conocimientos. Los algoritmos determinan como resolver problemas de alguna clase y los datos caracterizan el problema particular. El conocimiento no se ajusta a la filosofía planteada, ya que la mayor parte de él consiste de fragmentos que especifican la destreza de los expertos. Por consiguiente se requieren nuevas formas de organización de estos fragmentos, debiendo usar entidades útiles para la toma de decisiones en forma computarizada.

Por otra parte, los sistemas del conocimiento (SC), que emplean el conocimiento humano para resolver problemas que requieren inteligencia, representan y aplican el conocimiento computacionalmente y dada la tendencia incremental del potencial de las máquinas se esperan en breve SC versátiles y poderosos, superando por mucho a las técnicas tradicionales de almacenar, transmitir y usar el conocimiento.

Los SC agrupan los fragmentos del conocimiento en una base de conocimientos (BC), accesándola para razonar sobre problemas específicos. Estos sistemas difieren de los sistemas de programación tradicionales en la organización, en la incorporación del conocimiento, en la operación y en la impresión que causan a los usuarios cuando interactúan con éstos.

Los SC tratan de simular el comportamiento de un experto humano, siendo algunas aplicaciones definitivamente exitosas, entre las que figuran:

- Diagnóstico médico.
- Configuración de computadoras y entrenamiento.
- Exploración minera.
- Interpretación de estructuras moleculares.
- Toma de decisiones financieras.
- Operación de sistemas eléctricos.

En Stanford se desarrolló el primer sistema considerado como experto, Dendral; el primer sistema exitoso de aprendizaje Meta-Dendral y una gran variedad de aplicaciones de medicina.

El uso más generalizado y exitoso de estos sistemas se relaciona con aquellos problemas que sigan básicamente un proceso de toma de decisiones. Para dar una idea de los dominios de aplicación de los SC, a continuación se encuentran dos criterios del grupo de investigadores de IA de Stanford¹³:

- (1) Atacar sólo problemas amigables con las técnicas de IA aplicada y
- (2) Considerar sólo problemas importantes, difíciles y de gran valor; de acuerdo con los

C R I T E R I O S D E I M P L A N T A C I O N

- buscar problemas que los expertos puedan resolver telefónicamente,
- escoger problemas que los expertos puedan resolver en un tiempo no mayor de 3 hs ni menor de 180 s,
- escoger problemas con solución basada principalmente en el razonamiento,

- desechar problemas en los que los expertos estén en desacuerdo con la solución correcta,
- desechar áreas en los cuales no se pueda iniciar la solución de problemas con un subconjunto limitado del conocimiento,
- seleccionar una clase inicial de problemas que requieran solamente un subconjunto del conocimiento,
- identificar los problemas de entrenamiento y coleccionar los protocolos de solución de los expertos,
- construir una BC que contenga representaciones explícitas y declarativas de los conceptos de los expertos y reglas de razonamiento heurístico,
- pedir a los expertos que revisen las soluciones del sistema y sus líneas de razonamiento,
- evaluar el comportamiento de los sistemas con casos de prueba y
- aplicar el sistema a casos de entrenamiento y aumentar su BC incrementalmente.

Existen problemas que muy pocas gentes pueden resolver; son éstos considerados difíciles, de solución inteligente y del ámbito de un experto. Estos pueden resolverse también por programas, y en muchos campos con un éxito rotundo; sin embargo conviene tener en mente el

E S T A D O D E L A R T E Y C O M E R C I A L

- (1) Los SC transforman libros y conocimiento de expertos en una forma activa capaz de efectuar trabajo de mucho valor.
- (2) El conocimiento está representado en muchas formas y se necesita de diversas herramientas para aprovecharlo.
- (3) Los SC se deben integrar con sistemas de FD, y la ingeniería del conocimiento es muy diferente de los trabajos de

programación convencional.

- (4) Los términos IA, SE ó SC son novedosos y para algunos mágicos por lo que el aspecto comercial debe tomarse con cierto cuidado.
- (5) Es difícil predecir la dirección de comercialización y de la tecnología, pero ambos cambiarán aceleradamente en lo que resta del siglo.

No cabe duda, es atractivo incursionar en este campo; sin embargo, algunos sistemas comerciales serán equivalentes a otros tradicionales ya conocidos y otros adquiridos cuando ya sean obsoletos.

Los problemas de la inteligencia requieren conocimiento. Todos parecen tener poco en común, lo único es que todos son de solución difícil. El conocimiento posee algunas propiedades no muy halagadoras, entre otras:

- es voluminoso,
- es difícil su caracterización precisa y
- es totalmente dinámico.

Entonces, para lograr un SE es necesario contar con técnicas adecuadas, que como mínimo satisfagan los siguientes

A T R I B U T O S D E L C O N O C I M I E N T O

- general. No es conveniente separar las situaciones individualmente; es mejor agrupar las que compartan propiedades

comunes,

- claridad. Debe entenderse por las personas que lo proporcionen,
- modificable. Poder alterarlo facilmente para corregir errores y cambiar situaciones que se presenten y
- extensivo. Debe usarse en un gran número de situaciones aun si no está totalmente completo y preciso.

2.3.2 Técnicas de los sistemas del conocimiento.

Los SE requieren de técnicas apropiadas que permitan llegar con éxito a soluciones de problemas. Se pueden representar piramidalmente¹⁴ las

TECNICAS DE LOS SISTEMAS DEL CONOCIMIENTO

(1) Herramientas de soporte. Son las técnicas requeridas en casi todas las aplicaciones, e incluyen:

- La programación simbólica. Engloba a: (1) la ciencia fundamental de la computación simbólica, (2) las técnicas prácticas para construir los sistemas simbólicos y (3) las técnicas para construir programación en forma incremental.
- El cálculo situacional¹⁵. Es una aproximación para representar secuencias de acciones y sus efectos. Esta técnica usa el concepto de "situaciones" las que cambian cuando se tienen que ejercer diversas acciones, o cuando datos nuevos implican una desviación a una situación determinada.

-- La búsqueda. Forma el núcleo de los sistemas del conocimiento, ya que de hecho el problema se define como un espacio de estados de búsqueda.

-- La heurística. Se define como "el arte de inventar o descubrir hechos valiéndose de hipótesis o principios que, aun no siendo verdaderos, estimulan la investigación". Amigables con la terminología de los sistemas del conocimiento, se puede establecer que la heurística es la técnica que mejora los procesos de búsqueda.

(2) Integrantes del conocimiento. En el segundo nivel de la pirámide de técnicas se encuentran las:

-- Restricciones. Se incorporan para expresar la imposibilidad de tomar u originar ciertos estados o valores violatorios y conclusiones falsas o inconvenientes. Algunos sistemas se basan en la habilidad de reconocer y satisfacer un conjunto complejo de restricciones simbólicas, incluyendo limitaciones de espacios, de tiempo o de relaciones lógicas.

-- Aseveraciones. Corresponden a una proposición cierta, un hecho. La mayoría de los sistemas del conocimiento incorporan su BD especializada de aseveraciones, proporcionando los medios para almacenar y obtener las proposiciones.

-- Reglas. Representan formas particulares de conocimiento declarativo o imperativo. Las reglas declarativas describen la forma en que trabajan las cosas en el mundo real, diciéndole al sistema que creer, sin especificarle como actuar. En cambio, las reglas imperativas le indican al sistema del conocimiento como actuar y prescriben métodos heurísticos para usarse en el proceso de solución.

-- Factores de certidumbre?. Designan el nivel de confianza para que el sistema del conocimiento asocie con sus datos re-

glas o conclusiones. Algunos sistemas emplean probabilidades condicionales de Bayes⁴ para estimar los factores. Otros usan valores subjetivos, como el rango entre -1 y +1, donde el extremo inferior implica la certidumbre de la negación, el superior certidumbre absoluta y el cero se toma sin opinión.

(3) Operación del sistema. En el tercer nivel se colocan las técnicas que impactan la operación del sistema, siendo:

-- Organización y control del sistema. Es necesario organizar y controlar las actividades del sistema según los principios de diseño estructural empleados. Se usan, por ejemplo, esquemas de control con encadenamiento hacia atrás o con encadenamiento hacia adelante.

-- Resultados intermedios. Por la complejidad de los sistemas del conocimiento, se requiere hacer uso eficiente de resultados intermedios. Este aspecto está íntimamente relacionado con los esquemas de organización y control, ya que generalmente se usa encadenamiento y una vez que se evalúa una evidencia se guarda el resultado para emplearlo posteriormente.

-- Justificaciones y explicaciones. Los sistemas del conocimiento justifican y explican las metas encontradas, siendo de suma importancia, sobre todo en áreas en las cuales los usuarios finales tomarán acciones basadas en las recomendaciones motivadas por la solución del sistema. Para construir una explicación, se transforman las reglas heurísticas del experto y las aseveraciones a líneas de razonamiento, las cuales muestran como un conjunto inicial de suposiciones producen una conclusión. Este punto es importante también para otros tipos de usuarios; por ejemplo, en el mantenimiento de la base de conocimientos, frecuentemente se actualiza el conocimiento y se crean casos de prueba pa-

ra validar la correcta operación del sistema.

-- Optimización. Los sistemas del conocimiento deben efectuar su tarea dentro de tiempos establecidos restrictivos; en especial en aquellas aplicaciones donde los usuarios esperan por una entrada o salida. Se requiere que las líneas de razonamiento que genere el sistema tengan un orden y una estructura que se forme un diálogo experto. Las partes más importantes a considerar que se relacionan con la solución del problema son: (1) generar y probar candidatos de solución en orden eficiente, (2) evitar computación redundante, (3) compilar las reglas simbólicas con efectividad, (4) obtener las aseveraciones eficientemente y (5) transformar la base del conocimiento en una organización tal que las tareas especializadas se manejen con efectividad por los algoritmos.

(4) Comunicaciones. La cúspide de la pirámide del conocimiento la forma los soportes de comunicación. Los sistemas del conocimiento deben comunicarse con: (1) especialistas del conocimiento, (2) usuarios finales, (3) BD y (4) otros sistemas de cómputo. Los sistemas del conocimiento emplean lenguajes dependientes de las características de comunicación de las fuentes transmisoras/receptoras. Usan editores de estructuras que permiten modificar la base de conocimientos con facilidad; se comunican con los especialistas del conocimiento con diálogos simples, explicando/justificando sus líneas de razonamiento y señalan donde deben efectuarse los cambios en la base de conocimientos. Con los usuarios finales se emplean formas naturales del lenguaje, para generar las preguntas e interpretar sus respuestas. Algunos sistemas requieren acoplarse con otros sistemas de cómputo, para ejecutar tareas secundarias de PD. En ocasiones un sistema de nivel superior puede hacer uso de otros sistemas de nivel inferior. Asimismo, es común el requerimiento de acceso BD en línea.

La figura 2-3 muestra los tres aspectos de los sistemas del conocimiento: (1) herramientas de desarrollo, (2) integrantes del sistema y (3) medio ambiente de operación. El sistema KS300¹⁴, por ejemplo, proporciona medios para el desarrollo de sistemas, validando cada vez que se modifica la BC la operación del sistema bajo control, en base a casos de prueba.

A los problemas del conocimiento, por su complejidad, se les cataloga en dos grandes grupos:

- (1) Espacio pequeño de búsquedas de solución. Requieren una sola línea de razonamiento, puede utilizarse una búsqueda exhaustiva -por ejemplo, búsqueda de anchura con encadenamiento atrasado- y no es necesario formular suposiciones iniciales.
- (2) Espacio grande de búsquedas de solución. Requieren varias líneas de razonamiento, son seccionables y se organizan de tal forma que cada "especialista" contribuya en la toma de decisión en forma oportuna, debiendo la sección de nivel superior mantener una agenda de acciones pendientes y poder poner en ejecución la parte que sea más contribuya en la solución.

2.3.3 Reglas de los sistemas del conocimiento.

Las reglas empleadas en los sistemas del conocimiento¹⁵ son:

SITUACION-ACCION ("IF-THEN")

Estas son conocidas como reglas de producción (RP) y si cierta situación se presenta, una determinada acción se realiza. Su uso se caracteriza por las respuestas lógicas o semilógicas que se presentan cotidianamente en el comportamiento humano.

En general, las reglas de producción presentan una muestra significativa de conocimientos de una área particular de aplicación. Cada base de conocimientos se forma con cientos de reglas, obtenidas de los expertos a través de entrevistas.

Las reglas de producción forman las bases de conocimientos, ya referidas con anterioridad. Las reglas se interconectan formando redes, estructuras del conocimiento, ver figura 2-4.

HERRAMIENTAS DE DESARROLLO DE SC

SISTEMA DEL CONOCIMIENTO

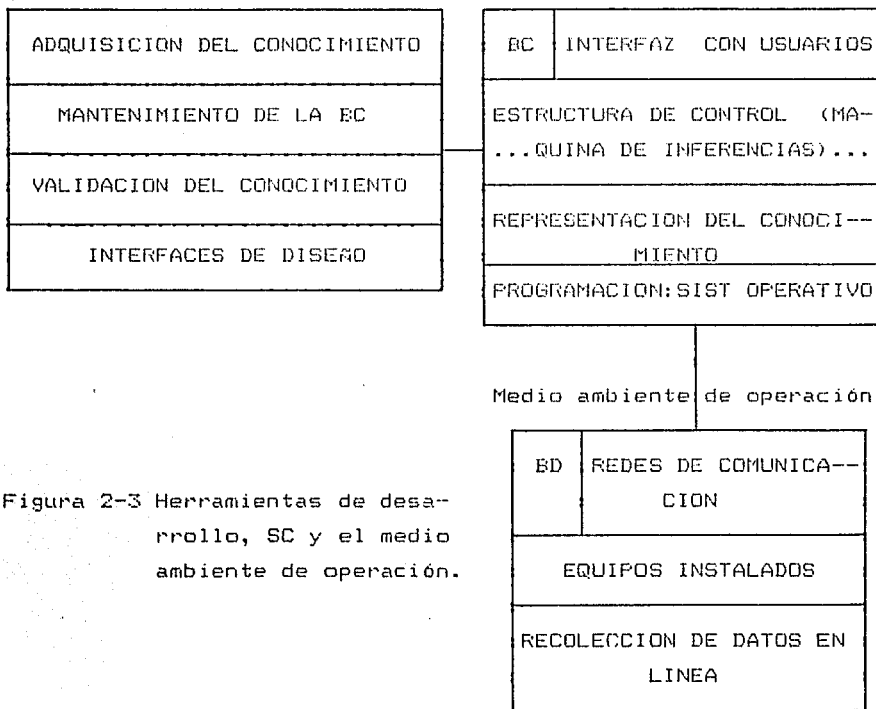


Figura 2-3 Herramientas de desarrollo, SC y el medio ambiente de operación.

Los sistemas del conocimiento aplican sus reglas empíricas en la solución de problemas, usando una evidencia para generar una hipótesis; con un cierto grado de incertidumbre, aprovechando

los factores de certidumbre (fc) mencionados. En ocasiones se emplean dos factores, uno para establecer la suficiencia de la evidencia para la generación de la hipótesis y el otro implica la necesidad de la evidencia para la hipótesis. Las reglas son codificadas a un lenguaje especializado y se accesan por los programas para producir el comportamiento experto del sistema.

La figura 2-5 muestra el ambiente funcional de un sistema del conocimiento que utiliza las reglas de producción. Un sistema como éste se conoce como sistema de producción. Como se observa está formado básicamente de la base del conocimiento, una máquina de inferencias y una BD global que incluye datos y aseveraciones.

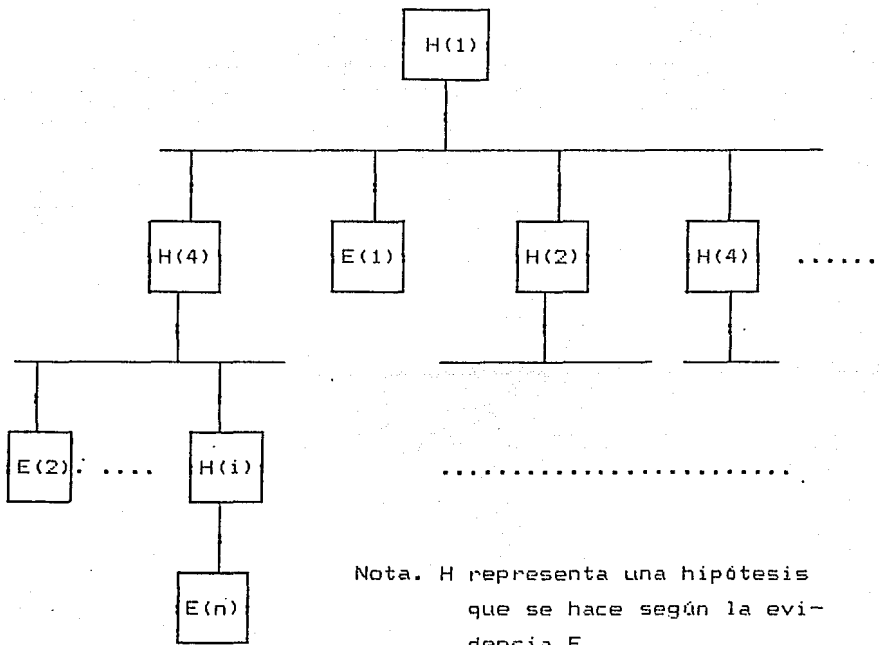


Figura 2-4. Redes de reglas.

La máquina de inferencias es el medio que usa el sistema del conocimiento para llegar a conclusiones. El sistema busca la satisfacción de la regla de acuerdo a la BD global. Las aseveraciones pueden causar cambios en el contenido de la BD, habilitando algunas reglas deshabilitando otras. La figura 2-6 muestra el formato general de las reglas. La máquina de inferencias habilita o deshabilita las reglas, y decide que reglas aplicar, según su estrategia de control.

Un sistema de producción por reglas no es como los programas lógicos secuenciales, ya que el orden de ejecución depende de los antecedentes o parte condicional de la regla. La máquina de inferencias o interpretador de las reglas puede usar alguna de las diversas estrategias de control. Una de las más simples es pasar a través de las reglas hasta que alguno de los antecedentes coincida con las aseveraciones de la BD. La regla se aplica y se actualiza la BD, se sigue el proceso de reconocer y actuar, hasta que se llegue al objetivo o no haya más reglas que aplicar.

Otras estrategias de control utilizadas comúnmente son el de encadenamiento hacia adelante y el de encadenamiento hacia atrás.

Como se indicó, la parte fundamental de las máquinas de solución de estos problemas es la búsqueda. Los problemas basados en este principio tratan de generar sistemáticamente candidatos de solución, probando su aceptabilidad. Sin embargo, como el número de candidatos puede ser muy grande, un proceso de búsqueda total puede resultar impráctico. Afortunadamente, los sistemas del conocimiento aceptan soluciones que sin ser las óptimas satisfacen sólo ciertos requisitos, tal y como sucede cuando un problema es resuelto por un humano. O sea, es perfectamente factible utilizar una búsqueda heurística, disminuyendo de manera importante los tiempos de solución empleados.

Aun cuando no siempre es posible, se debe seccionar el problema en un conjunto de problemas simples. En algunas aplicaciones, se hace énfasis en el uso de sistemas subexpertos, o especialistas; utilizan la técnica de "pizarrón" para manejar resultados intermedios. Esta técnica se basa en una estructura de datos compartida en la cual todos los especialistas tienen acceso. Cuando una subactividad se realiza, se examina el contenido del "pizarrón", se aplica el conocimiento para crear una nueva hipótesis, la que se escribe en la estructura y se modifican de ser necesario algunas otras ya existentes.

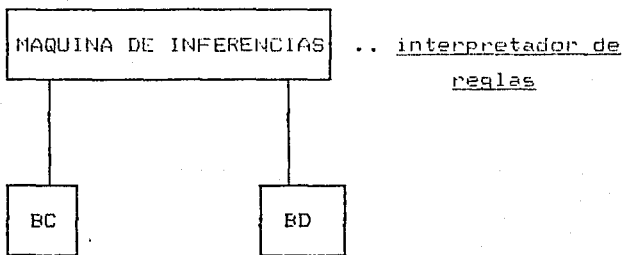


Figura 2-5. Sistema de producción del conocimiento

IF:	<u>antecedente 1</u> <u>antecedente n</u>	patrones a igualarse con entradas de la BD
THEN:	<u>consecuencia 1</u> <u>consecuencia n</u>	con factor cf(i) con factor cf(k)

acciones que pueden efectuarse si los antecedentes se igualan

Figura 2-6. Estructura general de las reglas de producción.

3. EXPERTOS EN EL CONTROL DEL SISTEMA ELECTRICO

3.1 Expertos en funciones primarias de centros de control

Diversos centros de control modernos, provistos de sistemas de control y manejo de información en tiempo real, cada vez más sofisticados y poderosos, son capaces de procesar y presentar volúmenes tremendos de datos, empleando medios gráficos, tabulares, líneas de lenguaje natural, etc. Conforme los procesos bajo control crecen, su operación es más compleja, haciendo convenientes otras funciones y por consiguiente se requiere de más y más datos. También, los tiempos de respuesta para la adquisición y notificación se tornan a veces poco tolerantes. Este interesante panorama de evolución, tiene un costo muy elevado y no sólo económico. En efecto, resulta que el proceso de toma de decisiones se ha vuelto cada vez más duro, sobre todo durante situaciones operativas críticas.

La causa principal de este problema es la gran cantidad de información, tan dinámica y tan concentrada en periodos de tiempo cortos, que tienden a provocar un fenómeno denominado sobrecarga informativa¹², lo que puede agravar los estados de nerviosismo natural que experimenta el personal operativo, durante disturbios graves por los que puede pasar una planta o proceso y consecuentemente aumentar el riesgo de cometer errores de operación.

Una simulación de un accidente en una gran planta nuclear, con alrededor de unas 2 000 alarmas, adicionales a la información analógica, muestra que para una pérdida de enfriamiento es factible obtener 500 señalizaciones durante el primer minuto y otras 800 durante el segundo, lo que sugiere graves problemas en el análisis de los datos y por consiguiente en la toma de

decisiones¹².

La aplicación de sistemas expertos en tiempo real, se proponen como la solución en el manejo y presentación de información en los centros de control. Para los centros de control y despacho de redes eléctricas, se sugieren como áreas de interés las siguientes aplicaciones:

- (1) Manejo de alarmas para un centro de control y despacho.
- (2) Sistema de ayuda en la restauración total o parcial del del sistema eléctrico.
- (3) Entrenamiento de operadores.
- (4) Control de tensión y potencia reactiva.
- (5) Asistencia en la toma de decisiones.
- (6) Seguridad del sistema eléctrico.

3.1.1 Experto de alarmas.

La función SCADA es considerada como primaria en la estructuración de centros de control y despacho de sistemas eléctricos de potencia (SEP) y de sistemas de distribución de energía (SDE). Su objetivo básico es habilitar a los operadores con las herramientas de control/operación, para mantener a los sistemas eléctricos en condiciones seguras y de calidad. Dados los tamaños de los SEP/SDE su operación es cada vez más complicada y por lo tanto, los centros de control se han enriquecido con funciones muy poderosas en todos los niveles jerárquicos de las estructuras de control.

La IHM por ser el eslabón que enlaza a los usuarios con la máquina se ha mantenido en constante evolución, incluyendo actualmente novedosas formas de presentación de información: gráficas de seguimiento de valores de variables, varios colores, acercamientos en diagramas, etc; estas mejoras facili-

tan la interpretación y el manejo de la información.

Otros subsistemas que merecen especial atención en los SCADA son: (1) procesamiento de datos y (2) manejo/notificación de alarmas. Su gran importancia se debe a que muestran en la IHM: la topología de la red, la ocurrencia de fallas y estado de equipos y los datos de las maniobras realizadas; información que resulta de extrema trascendencia sobre todo en los estados de emergencia/restaurativo del sistema eléctrico. Además, estas funciones requieren cumplir especificaciones de tiempos de respuesta muy pequeños, sobre todo considerando los grandes volúmenes de información que se manejan. Por ejemplo, el sistema EMS del área eléctrica central contiene en su BD un total de 4600 puntos, que requieren procesamiento y la mayoría pueden provocar alarmas/eventos. Asimismo, el SCADA maneja un total de 5100 puntos de transmisión/subtransmisión/distribución, enrutando información a dos centros de despacho.

La información que se presenta al operador, resultados de las funciones mencionadas, a través de la IHM, se organiza cuidadosamente en desplegados gráficos/tabulares bien jerarquizados, pretendiendo dotar al despachador de medios óptimos de interacción para el control de los diversos estados de los SEP/SDE. No obstante lo anterior, surgen tres cuestionamientos importantes:

- (1) ? En qué situaciones estos medios son inútiles o de poco uso?.
- (2) ? Qué datos pueden confundir a los operadores y en que condiciones podría presentarse el fenómeno de sobrecarga informativa?.
- (3) ? Cómo podrían solucionarse, de existir, estos problemas?.

A fin de responder, al menos parcialmente, las interrogantes

planteadas se realizó un análisis basado en un muestreo restringido, en base a la información de alarmas/eventos que el sistema SCADA les notificó a los operadores de transmisión/subtransmisión en uno de sus turnos de ocho horas de jornada. A continuación se presentan los resultados del análisis y los antecedentes relevantes que se observaron durante la revisión de la información recopilada y algunos otros datos característicos del sistema.

3.1.1.1 Análisis de información de alarmas/eventos de un sistema de control.

Para responder las interrogantes planteadas es necesario realizar un análisis extenso de la información presentada por los sistemas de control a los operadores de los centros de control. Se presenta adelante los resultados de una muestra de información tomada del sistema SCADA del área eléctrica central, en la oficina de control y despacho (transmisión/subtransmisión), recopilando todas las alarmas/eventos presentadas en un turno de 8 hs de labor, en el cual el sistema eléctrico transitó por sus tres estados característicos. Entonces, la muestra de información, norma bastante bien el criterio para evaluar su utilidad e inferir si se tiende a provocar el fenómeno de sobrecarga mencionado.

La tabla 3-1 resume las alarmas/eventos que se notificaron a los operadores. En la tabla se separan los estados del SEP y se toman períodos discretos de un minuto en una gran parte de la misma, reflejando claramente, en esta base, los períodos de máxima información señalizada. De esta tabla se concluye lo siguiente:

- (1) El SEP experimentó tres estados de emergencia, ocasionados por sendos disturbios, cuya causa esta fuera de este análisis.

(2) Los dos primeros disturbios surgieron en instalaciones no supervisadas por el sistema de control y en éstos, por suerte, sólo proceso alarmas/eventos de tres subestaciones involucradas en el problema. En el tercer disturbio, aparece en una de las mismas subestaciones la operación de una protección primaria de una línea y la apertura de dos de sus interruptores. En este periodo aparecen alarmas en otras subestaciones; un 10% del total de información.

(3) Algunos parámetros cuantitativos son:

-- 602 alarmas/eventos notificados en el turno.

-- 50 alarmas en un minuto como periodo de máxima densidad.

-- 195 alarmas en diez minutos como periodo de máxima densidad con esta base.

-- 56 veces se repitió una misma alarma. Ver tabla 3-2.

(4) Algunas variables muestran una correlación bien definida, como puede apreciarse en la tabla 3-3, la cual con una organización matricial agrupa columnas estratégicas de relaciones entre variables. A cada grupo de información se le destinan factores de certidumbre que valoran la validez de una posible situación, dependiente de una condición establecida. Se propone la técnica comunmente usada de +1, 0, -1. El fc en este caso podría adquirir valores diferentes para condiciones distintas. Por ejemplo, para las tensiones de dos barras de una subestación, se tiene:

REGLA(i):

Para un mismo nivel de tensión, los valores de tensión en las barras de una subestación son iguales.

Caso 1. Barras amarradas--- $fc=+1$.

Caso 2. Barra 1 libre y barra 2 en servicio -- $fc=-1$.

Caso 3. Barras separadas y en servicio ----- $fc=0$.

- (5) En los estados de emergencia se observa claramente que el SEP mantuvo oscilaciones en frecuencia y tensión.
- (6) Una extrapolación simplista resulta alarmista si se considera que en lugar de las tres subestaciones con problema, supervisadas por el SCADA, hubieran sido diez. Aparentemente, es factible obtener picos de hasta 150 alarmas/minuto, si esta sobrecarga la soportara el sistema de control.
- (7) Aun cuando la tabla carece de datos para establecerlo, es seguro que tantas alarmas de tensiones se deben al uso incorrecto de valores de bandas muertas.
- (8) Otro tipo de señales correlacionadas, no incluidas en la tabla 3-3, son:

LIN 83110 PROT PRIM
INT LIN 83110
INT ENL 11TA
AL INT BLOQUEADO**

FALLA SERVICIO CA
ALERTA BATERIAS
AL GRAL BANCOS
AL GRAL INT

** Cuando un interruptor opera, sobre todo varias veces, podría ocurrir (e.g falla en presión de aire).

- (9) Cabe aclarar que la información se presenta al operador en desplegados clasificados por severidad, categoría y función. Además, la información se distribuye por área de

responsabilidad. Sin embargo, en la muestra tomada la mayor parte de las alarmas recibidas son de emergencia y se notificaron al mismo desplegado destinado a la categoría de transmisión.

En general, las alarmas son generadas por varias condiciones o situaciones, entre otras:

- La operación de protecciones.
- La operación no comandada de interruptores.
- Variables analógicas fuera de su límite normal de operación.
- Falla permanente o transitoria de los equipos supervisados.
- Baja frecuencia.
- Señales falsas.

El uso que los operadores le dan a la información de alarmas/ eventos, depende del estado del sistema eléctrico, de la severidad de la alarma y la zona donde se estén realizando maniobras. Por ejemplo, de algunas entrevistas a operadores, se captaron los siguientes comentarios.

- " Las alarmas de baja frecuencia relacionan a los alimentadores botados por baja frecuencia. La recepción repetida de éstas implican la oscilación del sistema, siendo útiles las primeras veces que se presentan".
- " La apertura de un interruptor y la protección que operó es un conjunto de señales normativas para la reconexión del elemento; por ejemplo, los bancos de

transformadores no se prueban si se libran por protección primaria".

- " La notificación de una sola alarma en la IHM, no implica necesariamente su atención inmediata, ya que con frecuencia se presentan alarmas fugaces. Sin embargo, si se observan problemas de frecuencia, tensión o se libran elementos, se realiza de inmediato: (1) se reconocen las alarmas, (2) se determina que las provocan y su trascendencia en el problema, (3) se investiga la secuencia de eventos relacionados y (4) se deciden las acciones correctivas".

Un punto de vista interesante de un operador¹⁴ se comenta brevemente:

- " Tenemos las herramientas que decimos necesitar, ¿por qué estamos en desacuerdo?. Dudo que haya un solo operador que quiera regresar a las herramientas del pasado. Sin embargo, los centros de control modernos tienen sus problemas. Hay una muy buena cantidad de centros con estos problemas y que ofrecen oportunidades de mejoras.

Oportunidad 1. Es necesario producir más inteligencia y menos datos.

No se debe confundir datos con inteligencia. Inteligencia es filtrar o procesar datos y reportar algo que no sabemos y debieramos conocer.

Ejemplo. Alarmas de tensión. Cuando una subestación sale de sus límites normales de operación en sus tensiones de barras, definitivamente, se requiere conocer de inmediato el problema;

sin embargo, suponer que un par de líneas de alta tensión se sobrecargan y se libran causando baja tensión en cinco estados. No es posible pensar en que deseamos notificación de los cientos de alarmas de las subestaciones involucradas".

El análisis realizado, los comentarios recibidos y la experiencia de muchos años en este campo, autoriza la presentación de los

FACTORES INDESEABLES DE PROCESAMIENTO/PRESENTACION DE ALARMAS

1. Alarmas múltiples para el mismo evento.
2. Demasiadas alarmas en períodos cortos.
3. No se incluye ayuda alguna que norme el "razonamiento" del operador sobre la situación corriente.
4. Alarmas fugaces, sin trascendencia.
5. Alarmas falsas y pérdida ocasional de algunas reales.
6. Las alarmas no se manejan de acuerdo a prioridades dinámicas que dependan de la situación que se presente.
7. Las alarmas no se agrupan por problemas, dificultando su análisis.
8. Los mensajes descriptivos pueden ser ambiguos o confusos, debido a que los formatos utilizados son rígidos.
9. La dinámica de actualización de desplegados de alarmas dificulta la lectura de la información, en períodos

cortos con picos de actividad de notificación de éstas.

Por todo lo anterior, se concluye lo siguiente:

- (1) Las alarmas presentadas en las salas de control son de poco uso o inútiles si no se tiene evidencia de problemas reales en el sistema eléctrico. Ironicamente, cuando la información es más necesaria, disturbios, a veces es casi imposible su interpretación oportuna.
- (2) Los datos que pueden confundir a los operadores tienen relación directa con los factores indeseables enumerados antes. El fenómeno de sobrecarga informativa es muy probable que se presente en condiciones de disturbio.
- (3) La solución a este importante problema se trata adelante.

3.1.1.2 Solución del problema.

La problemática relacionada con el manejo y presentación de alarmas, en un centro de control, se debe a que los procesadores utilizados simplemente dan como resultados líneas de información arregladas en desplegados de resúmenes de alarmas, siguiendo los estados anormal/normal de los diferentes puntos sensados, filtrando solamente los cambios comandados por el operador.

Para la solución de este problema se propone un sistema experto de manejo de alarmas, para lo cual se plantean los requerimientos a satisfacer, se dan algunas de las reglas que cubren los casos de mayor trascendencia. También, se proponen las vistas de la IHM y se discuten dos posibles estructuras básicas del sistema.

Requerimientos del experto.

PREMISAS FUNDAMENTALES IDEALES:

- (1) Generación de líneas de razonamiento con ayudas gráficas, a través de la IHM, que determinen los problemas presentes.
- (2) Explicar, si se requiere, el porqué de las conclusiones.
- (3) Jerarquizar los problemas de acuerdo a prioridades dinámicas.
- (4) Evitar la notificación de alarmas fugaces, de acuerdo con reglas que tomen en cuenta severidad, tiempo de permanencia y repetibilidad.
- (5) Conjuntar información en forma cronológica, separando problemas por zona y tipo.

CASOS DE INTERES PRIMARIO:

Caso 1. Desconexión de elementos.

La figura 3-1 ejemplifica la interconexión de dos subestaciones por una línea de transmisión. Se contemplan los elementos de desconexión y variables analógicas, susceptibles de alarmar. Con el mismo criterio se han incluido transformadores localizados en las subestaciones.

Algunas reglas aplicables son:

Regla 1. Desconexión correcta de un elemento por falla.

Enunciativa: "Si la(s) proteccion(es) primaria(s) (o respaldo) de un elemento en la(s) subestacion(es) operan y el(los) interruptor(es) de los extremos se encuentran abiertos, entonces generar la línea de razonamiento n".

Pseudo lenguaje:

"SI

ALARMA SEi PROT TIPO ELEMENTO =OPERO

Y

(ELEMENTO=LINEA Y TIPO=PRIM Y MISMA ALARMA SEj = OPERO)

Y

INTERRUPTORES AMBOS EXTREMOS = ATOS

ENTONCES

ELEMENTO DESCONECTADO PROT TIPO (fc=+1)

DONDE:

ELEMENTO(LINEA, TRANSFORMADOR) Y TIPO (PRIM, RESP) "

La consecuencia implica una línea de razonamiento, que se pretende presentar en la IHM como sigue:

FECHA	HORA	LINEA X	SEi	SEj	DESCONECTADA POR PROT PRIM
-------	------	---------	-----	-----	----------------------------

Razonamiento 1. Desconexión correcta de una línea por P.PRIM

Regla 2. Desconexión de un elemento con posibles fallas de adquisición de datos.

Se debe contemplar en las reglas la posibilidad de fallas en la adquisición de datos del campo, o condiciones topológicas que requieran procesamiento de análisis adicional, para crear las líneas de razonamiento. Entre estos casos se pueden enumerar:

- (1) Interruptor sin participación (eliminado por cuchillas).
- (2) Falla real de la apertura de un interruptor, seguramente operarán protecciones de respaldo, desconectando elementos extras.
- (3) Falla de la señalización de la operación de la protección en uno de los extremos.
- (4) Falla de exploración de una de las terminales remotas.
- (5) Señales falsas.

Se proponen sólo dos reglas para controlar estas situaciones.

"SI

ALARMA SEi PROT TIPO ELEMENTO =OPERO

Y

(ELEMENTO=LINEA Y TIPO=PRIM Y MISMA ALARMA SEj = NORMAL)

Y

INTERRUPTORES AMBOS EXTREMOS = ATOS

ENTONCES

ELEMENTO DESCONECTADO PROT TIPO (fc=+0.9)

Y

ALARMA PROT TIPO INCORRECTA "

Las dos líneas de razonamiento aparecerán en la IHM como:

FECHA HORA LINEA X SEi SEj DESCONECTADA POR PROT PRIM
SEÑALIZACION INCORRECTA PROT PRIM SEj

Razonamiento. Desconexión correcta de una línea por PROT PRIM, problemas en datos.

"SI

ALARMA SEi PROT TIPO ELEMENTO =OPERO

Y

(ELEMENTO=LINEA Y TIPO=PRIM Y MISMA ALARMA SEj = NORMAL)

Y

NO TODOS INTERRUPTORES AMBOS EXTREMOS = ATOS

ENTONCES

ELEMENTO DESCONECTADO PROT TIPO (fc=0) "

Dada la incertidumbre en este caso, se propone acompañar el razonamiento con un diagrama que muestre el estado de los dispositivos de desconexión.

FECHA HORA LINEA X SEi SEj DESCONECTADA POR PROT PRIM
diagrama similar a la figura 3-1

Razonamiento. Desconexión de elementos por PROT PRIM, antecedentes con total incertidumbre.

Los antecedentes establecidos en la reglas deben igualarse con los datos de tiempo real. La reglas no detallan el procesamiento requerido, el cual no es tan simple; por ejemplo, la detección de la alarma del extremo opuesto requiere considerar los tiempos de exploración del sistema.

Regla 3. Alarmas de baja frecuencia.

Enunciativa: "Si se presentan las alarmas de baja frecuencia de los diferentes pasos en una o más subestaciones, entonces agruparlas por pasos de desconexión y por grupos de subestaciones, creando una línea para notificar el tipo de problema y un desplegado de tiro de carga".

"Si se presentan repeticiones de transiciones de alarma-normal entonces concluir la oscilación del sistema o islas y mantener una línea de razonamiento fija, sin interferir la notificación de los demás problemas corrientes".

Pseudo lenguaje.

"Si

ALARMA SE_i BFREC PASO = OPERO

Y

MISMA ALARMA OTRAS SE_s INTERCONECTADAS = OPERAN

Y

INTERRUPTORES RELACIONADOS = ATOS

ENTONCES

SE_s OPERACION BFREC PASO (fc=+1)

Y

CREAR DESPLEGADO TIROCARGA

DONDE:

PASO (UNO, DOS, TRES) "

"SI

MISMAS ALARMAS = OSCILAN

ENTONCES

SISTEMA O ISLA(S) OSCILANDO ".

Regla 4. Violación de límites de tensión.

"SI

ALARMA SE_i VB X VIOL LIM = ALARMA

Y

MISMA ALARMA OTRAS SE_s INTERCONECTADAS = ALARMA

ENTONCES

SE_s ALARMA TIPO (fc=+1).

Y

CREAR DESPLEGADO SE_s VB X VALOR

DONDE:

X (1,2,3,4) Y TIPO (AL LIM BAJO, AL LIM ALTO, SIG123)"

"SI

MISMAS ALARMAS = OSCILAN

ENTONCES

SISTEMA O ISLA(S) OSCILANDO "

"SI

ALARMA SEi VB X VIOL LIM = ALARMA

Y

ALARMA SEi VB OTRA X MISMA TENSION VIOL LIM = ALARMA

Y

BARRAS = AMARRADAS

ENTONCES

ELIMINAR SEGUNDA ALARMA "

Regla 5. Combinación de alarmas y filtros de tiempo.

"SI

ALARMA SEi IDj TIPO = ALARMA

Y

ALARMA SEi IDk MISMO TIPO = ALARMA

ENTONCES

CREAR ALARMA SEi IDjk PROBLEMA (fc=+1) "

"SI

ALARMA SEi IDj TIPO = ALARMA

Y

TIEMPO ACTUAL - TIEMPO OCURRENCIA > TIEMPO PERMANENCIA

Y

NO MISMA ALARMA = NORMAL

ENTONCES

ALARMA SEi IDj TIPO = VALIDA "

Reglas de presentación de alarmas.

Regla 1. Un nivel de tensión mayor implica mayor prioridad, respecto a otro nivel de menor tensión, para la misma jerarquía de problema.

Regla 2. La jerarquía de los nodos se determina por

JERAR NODOS (SEi1, ..., SEin)

Regla 3. La jerarquía de los problemas se determina por

JERAR PROBLEMAS (colapso_total, islas, desc_elemen_falla, etc)

Desde luego, faltan una gran cantidad de reglas, algunas son las mismas o al menos muy similares a las de un experto comercial presentado adelante. Para crear las reglas complementarias de la EC debe entrevistarse a los operadores y no sólo de un mismo centro y como se indicó, este proceso lleva demasiado tiempo. Aun con estas limitantes, lo antes expuesto se considera suficiente para proponer la estructura conveniente del experto requerido.

3.1.1.3 Experto comercial prototipo.

La estructura de un sistema experto comercial¹⁷ se muestra en la figura 3-2. Este sistema que opera en tiempo real analiza las alarmas y decide que desplegar al operador y se conserva la posibilidad de invocar en cualquier momento a los desplegados de alarmas originales.

Este sistema maneja las reglas según la siguiente clasificación:

Reglas de nivel de alarmas:

Determinar el tipo de elemento del sistema (barra, línea, transformador, etc) para los cuales algunos parámetros determinan su alarma. Además hay reglas para determinar si estos elementos ya han sido alarmados para el mismo nivel de alarma o si el parámetro de alarma es más grave (nivel AL a AL1 o de AL1 a AL2).

Reglas de eliminación de alarmas

Suprimir las siguientes alarmas:

- (1) Regresos a la normalidad si no se detectaron previamente las anomalías.
- (2) Suprimir todas las alarmas de apertura/cierre de interruptores como resultado de operación de protecciones, libramientos y reconexiones.
- (3) Suprimir alarmas de tensiones de barras si ya se detectó el problema en otra barra cercana.
- (4) Suprimir alarmas de flujos (MW, MVAR, MVA) sino se han excedido previamente los niveles de alarma.

Reglas de notificación de alarmas.

- (1) Regreso a la normalidad de elementos para los que se generaron antes alarmas.
- (2) Alarmas de generación, dentro/fuera.
- (3) Desconexión de elementos en ambos extremos cuando se identifique interruptores abiertos en ambos extremos. En caso contrario imprimir un mensaje especial indicando un error.

- (4) Desconexión de elementos en un extremo, cuando el tiempo transcurrido desde su detección es mayor que el tiempo de exploración.
- (5) Alarmas de tensión de barras para las cuales no se han obtenido alarmas de barras cercanas.
- (6) Alarmas de flujos que presenten condiciones peores a las anteriores procesadas.

Este sistema utiliza las dos técnicas de razonamiento. Si se da información específica utiliza el razonamiento hacia adelante para generar la conclusión respectiva. Para esto iguala la información de entrada con aquellas reglas que la requieren por sus antecedentes y en caso de cumplir con todos, se produce(n) la(s) consecuencia(s), dentro de las que pueden generarse parámetros requeridos por otras reglas. Al final del proceso de búsqueda se produce la conclusión que se envía como resultado. También, puede trabajar con razonamiento hacia atrás, en el cual conclusiones específicas son probadas, a partir de las consecuencias hasta igualar los antecedentes.

3.1.1.4 Estructura del experto.

El problema planteado de notificación inteligente de alarmas, por su complejidad, cae en el dominio de espacio grande de búsquedas de solución. El sistema que requiere generar más de una línea de razonamiento se puede seccionar, creando sub-expertos o especialistas, por ejemplo: (1) manejo de desconexión de elementos (desconexión), (2) análisis sofisticados de disturbios (alaldist), (3) baja frecuencia (bajafrec), (4) combinación y retardo de alarmas (filtro tiem com), (5) generador de líneas de razonamiento (genraz).

Todos estos especialistas y algunos otros pueden realizar sus tareas en base a una agenda, aplicando la técnica de pizarrón para formar las conclusiones requeridas.

También en este caso las dos técnicas de razonamiento son candidatas que se deben considerar al crear los modelos del sistema. Los tres aspectos claves de la figura 2-3, son definitivamente indicativos para emprender la tarea de desarrollar el sistema experto: (1) herramientas de desarrollo, (2) integración en los sistemas de cómputo y (3) medio ambiente.

Otras características identificadas del problema son:

- (1) Predecible.
- (2) Consistente.
- (3) Interactivo.

De estas tres, resulta principalmente interesante plantear los aspectos relacionados de la IHM, lo que se hace adelante.

3.1.1.5 Interfaz hombre-máquina.

Las figuras 3-3 y 3-4 presentan las vistas propuestas para comunicar el sistema experto con el usuario final. Estas vistas de notificación de problemas no evitan la solicitud de los resúmenes tradicionales de alarmas.

Se propone una ventana, columna a la derecha, que identifique los diez problemas más importantes, usando una notación nemónica corta y ordenados en base a la prioridad dinámica que corresponda. Una vez que el operador haga el reconocimiento del problema de mayor prioridad, las señales se reorganizan, per-

mitiendo la inclusión de nuevos problemas prioritarios. A petición del operador la presentación del siguiente problema puede alterarse; seleccionando un problema de la lista. Una vez que se reconoce un problema, éste pasa a una lista de pendientes, la que puede mostrarse por petición en otra ventana localizada a la izquierda.

Las otras ventanas de comunicación con el usuario final se localizan en el área central de la pantalla. La primera útil para problemas de sistema, frecuencia, formación de islas, etc. La segunda se destina a la presentación de líneas de razonamiento de un problema o grupo de problemas relacionados. La tercera, para las ayudas gráficas y la última para las explicaciones, sugerencias o estrategias posibles de solución. Como puede observarse en las figuras, se dispone de una pequeña área de comandos (RECONOCER, PORQUE, SELECCION, PENDIENTES, EJECUTAR, CANCELAR, SUGERENCIA).

En las figuras se ejemplifican dos condiciones hipotéticas que el SEP podría experimentar. Lo interesante del sistema experto que se propone y que se considera de realización factible, es que la IHM notificaría aproximadamente unos 20 problemas, en lugar de las 600 líneas de información de alarmas que se le presentaron a los operadores del turno analizado (tabla 3-1), lo que representaría enormes ventajas, influyendo positivamente en los aspectos de la facilidad y seguridad operativa.

3.1.1.6 Experto distribuido.

El sistema experto propuesto es sumamente complejo, recordar que se plantearon premisas ideales. Estas premisas se plantearon así, ya que los sistemas de IA teóricamente nunca se liberan y se comprende que las metas planteadas deben ser suficientemente amplias para lograr con el tiempo sistemas muy po-

derosos.

No obstante lo anterior, se considera importante plantear una posible alternativa de solución, denominada el sistema experto distribuido. La idea del sistema es distribuir la inteligencia creando un sistema experto maestro y varios sistemas expertos remotos.

La gran ventaja de esta posible estructura es que el dominio del espacio de la solución, efectivamente se secciona y lo más importante, se puede tener un desacoplamiento entre los dos sistemas jerárquicos.

Los sistemas expertos remotos, representan un solo desarrollo de programación, con algunas tareas como:

- (1) Análisis de desconexión de elementos por falla. El reporte al sistema maestro simplemente es la operación correcta de los esquemas de protección o la operación incorrecta y un código de error.
- (2) Manejo de tensiones de barras locales y alarmas, conjuntando información.
- (3) Eliminación de alarmas fugaces y de alarmas falsas.
- (4) Retardo y combinación de alarmas.

Con esta estructura, el experto para el manejo de alarmas en el sistema maestro sería simplificado en forma importante, sobretudo al filtrar y combinar señales a nivel de la remota. Sin embargo, existe el problema de que al contar con un número de instalaciones con remotas en funcionamiento, la implantación de los expertos locales puede resultar sumamente costoso.

xx ESTADOS DEL xx SISTEMA xx ELECTRICO xxxxxxxxxxxx	normal P1	emergencia/restaurativo P2										
DESCRIPCION DE ELEMENTOS	7:00- 7:27	t	i	e	m	P	o	e	n	m	i	n
SE COY+CRU	condiciones operativas de elementos en el tiempo											
UTR FUERA	x A	Nc										
LINEA MAGDA MH	x A	N										
SE CUAJIMALPA												
B1 150 KVx												
B2 150 KVx												
BCO T221 A 23 KVx	Ab	N	Ab				N					
BCO T221 C 23 KVx	Ab	N	Ab				N					
LIN B3110 MWx			Aa									
LIN B3130 MWx			Ab									
LIN B3130 MVAx	Aa						N					
BAJA FREC PASO 1 x												
BAJA FREC PASO 2 x												
BAJA FREC PASO 3 x												
FALT POTEN SEC TPx												
AL GRAL INTERRUPTS				A			N					
AL GRAL BANCOS	A	N										
ALERTA BATERIAS												
FALLA SERV CA												
SE DE BUEN												
B1 150 KVx	Ab	N			Ab					N		
B2 150 KVx	Ab	N			Ab					N		
BCO T221 A 23 KVx	Ab	N			Ab					N	Aa	N
BCO T221 B 23 KVx	Ab	N			Ab					N	Aa	
BCO T221 C 23 KVx	Ab	N			Ab					N	Aa	
BCO T221 A MVAx	Ab	R			Ab					N		
BAJA FREC PASO 1 x												
BAJA FREC PASO 2 x												
BAJA FREC PASO 3 x												
FALT POTEN SEC TPx												
INT 83020 TXC	A		N	A					Ac		Cc	
AL GRAL INTERRUPTS	A	N					N					
AL GRAL BANCOS	A											
ALERTA BATERIAS									A	A	N	
FALLA SERV CA												
SE FISISA												
B1 85 KVx	Ab											N
INT CLIENTE									A			
AL GRAL SE	A											N
-----x-----												
Totales x parcial:	4	15	13	7	0	5	5	7	5	5		
xxxxxxx												
xpor P1:	P1 (1 mdo + 3 alarmas) ; P2 (2 mdos + 60 alarmas)											
Claves: A=alarma N=normal Aa=alarma por límite alto Nc=normal por comando												
C=cerrado en campo Ab=alarma por límite bajo Cc=cerrado por comando												
A=abierto en campo x=emergencia Ac=abierto por comando												

Tabla 3-1 Notificación de alarmas/eventos (sistema SCADA, CDC) al despachador, oficina de transmisión/distribución, área eléctrica central, turno 7-15 hs, 190587.

DESCRIPCION	REHEBIOS DE BUEN	CUAJINALPA	FISISA	totales	categoria	estados e informacion
AL GRAL DE BANCOS (ver notas 2 y 3 tabla 4-1)	56			56	alerta	
BAJA FREC PASO 1 (BFP1)	34	20		62	emergencia	AL/NORMAL
BAJA FREC PASO 2 (BFP2)	28	24		52	emergencia	
BAJA FREC PASO 3 (BFP3)	24	20		54	emergencia	
B1 150 KV (B150V1)	32	10		42	emergencia	
B2 150 KV (B150V2)	32	10		42	emergencia	ALRMA/NORMAL
T221 A KV (B23V1)	30	21			emergencia	ALRMB/NORMAL
T221 B KV (B23V2)	30	21			emergencia	ALRMA/ALRMB
T221 C KV (B23V3)	26	-			emergencia	ALRMB/ALRMA
B1 85 KV (B05V1)			26	26	emergencia	ALRMA SIG123 ALRMB SIG123 nnnn.n UI

claves: AL=ALARMA NORMAL = NORMAL ALRMA=VIOLACION LIMITE ALTO ALRMB=VIOLACION LIMITE BAJO
 SIG= NIVEL DE SIGNIFICANCIA (indica que la violacion del limite un cierto porcentaje adicional)
 SIG1 PRIMERO NIVEL DE SIGNIFICANCIA (el sistema maneja hasta tres)
 nnnn.n UI= VALOR DE LA VARIABLE EN UNIDADES DE INGENIERIA (se adjunta al mensaje de alarma)

Tabla 3-2 Repeticion, clasificacion y estados posibles de alarmas.

Baja frecuencia	tensiones de barras						proteccion de lineas							
ODB/CJK	fe	C(i)	ODB/CJK			FIS	cf	C(i)	CJK			cf	C(i)	
BFP1:BFP2:BFP3	B150V1:B150V2:B23V1:B23V2:B23V3:B05V1						IL0310PP:I03110:II1TA							
x/x	1	1	x/x				x	1	1	x	x	x	1	5
x/x	1	1	x/x				x	1	1					
x/x	1	1		x/x			0	-						
x/	x/	x/	.6	2		x/x	0	-						
/x	/x/	/x/	.6	2	x/	x/	1	3						
x/	x/	x/	.7	2	/x	/x	1	3						
/x	/x/	/x/	.7	2	x/	x/	.6	4						
	x/	x/	.7	2	/x	/x	.6	4						
	/x/	/x/	.7	2										

condiciones C(i): 1, subestaciones acopladas 2, demasiado desequilibrio entre la demanda y la generacion
 3, barras aparradas 4, valores de tension del lado de alta muy fuera de rango
 5, operacion correcta del esquema de proteccion y de interruptores

Tabla 3-3 Correlacion de variables y asignacion de factores de certidumbre propuestos para ejemplificar su uso.

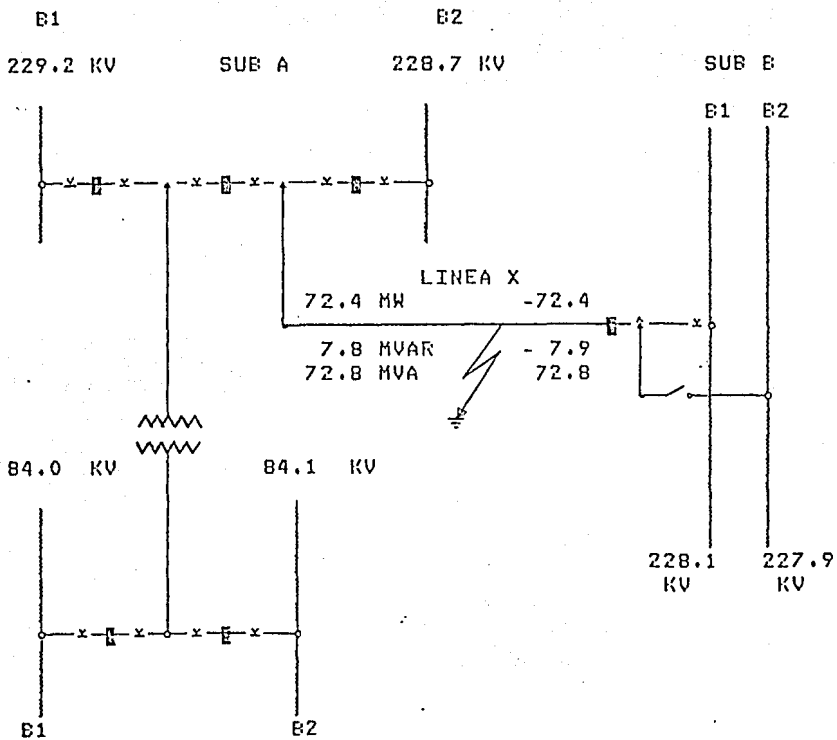


FIGURA 3-1. FALLA DE UN ELEMENTO DEL SISTEMA ELECTRICO

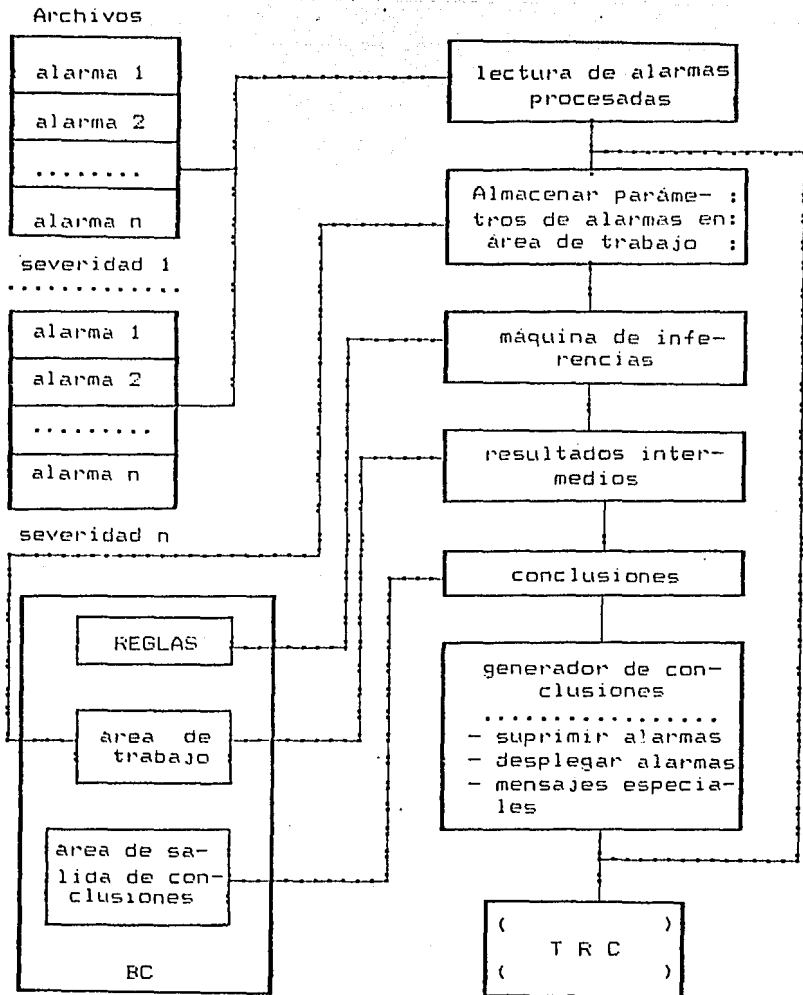


Figura 3-2 Estructura de un procesador inteligente de alarmas para tiempo real.

SIST OSCILANDO (ODE CJM IZT CRS) BAJA FREC						BFZS
062287 15:23:14 LINEA X SUB-A SUB-B						D1L230
DESCONECTADA POR PROT PRIM						D2L85
SEÑALIZACION INCORRECTA DE INT						D3L85
53-1 LINEA X						
<p>The diagram shows a horizontal line representing 'LINEA X' connecting 'SUB-A' on the left and 'SUB-B' on the right. Above the line, there are two boxes labeled '53-1' and '53-2' with arrows pointing to the line. To the right of the line, there is a symbol for a meter or switch labeled '0.0 MW'. Below the line, there is a switch symbol. Vertical lines extend from the ends of the horizontal line to the labels 'SUB-A' and 'SUB-B'. There are also some additional symbols and lines on the right side of the diagram.</p>						FT400
						PT230
						EDDB
						EIZT
						ECRS
RECO NOCER	EXPLICA PORQUE	SUGE RENCIA	FEN DIENTE	SELEC CIONAR	EJECUTAR	CANCELAR

FIG 3-3. VISTA DEL SISTEMA EXPERTO PARA LA NOTIFICACION DE PROBLEMAS A LOS DESPACHADORES. EJEMPLO 1

SIST OSCILANDO (ODB CJM IZT CRS) BAJA FREC FORMO ISLA ZONA NORTE (VAJ MAD ESR REM ATI)							BFZS
53 AGUI1 ATO	062287 15:23:14 LINEA X SUB-A SUB-B						D1L230
FALL SERV EST	DESCONECTADA POR PROT PRIM						D2L85
	SEÑALIZACION INCORRECTA DE INT						
	53-1 LINEA X						D3L85
							PT400
	SUB-A						PT230
	SUB-B						
	PORQUE OPERARON LAS PROT PRIM EN AMBOS						E0DB
	EXTREMOS Y EL FLUJO EN MW DE LA LINEA X						EIZT
	ES CERO						
							ECRS
RECO NOCER	EXPLICA PORQUE	SUGE RENCIA	PEN DIENTE	SELEC CIONAR	EJECUTAR	CANCELAR	

FIG 3-4. VISTA DEL SISTEMA EXPERTO PARA LA NOTIFICACION DE PROBLEMAS A LOS DESPACHADORES. EJEMPLO 2

3.1.2 Experto en la restauración del sistema eléctrico de potencia.

Aprovechando la información del sistema en tiempo real y algunos de los módulos especialistas del sistema anterior, es factible crear un SE de ayuda a los operadores en el restablecimiento, total o parcial, del sistema eléctrico.

La idea de este experto nace al investigar en el área eléctrica central los procedimientos que se tienen para armar la red. Este proceso condujo a identificar que el conocimiento de los operadores se conjunta en un manual de procedimientos, que incluye las reglas y ayudas gráficas requeridas para este trabajo. No obstante el reconocimiento a este valioso manual, surgen importantísimos cuestionamientos:

- (1) ¿serán todas las reglas válidas?,
- (2) ¿se tendrá la experiencia suficiente para aplicar las reglas en el momento del disturbio?,
- (3) ¿será posible recuperar errores?,
- (4) ¿cómo simular las reglas para adquirir la experiencia?,
- (5) ¿será eficiente el mantenimiento del manual?.

La aplicación de un SE resuelve favorablemente todas las deficiencias del procedimiento planteado, su utilidad sería bien importante y se realizarían las siguientes tareas primarias:

- (1) Detección del disturbio e identificación de islas formadas.
- (2) Análisis del disturbio identificando que protecciones operaron y los elementos fallados.

- (3) Desconexión de elementos estratégicos para permitir el armado del sistema. Para los comandos, el experto debe sugerir al operador los candidatos y de ser aceptados generar las señales de control remoto.
- (4) Armado de las zonas o redes de acuerdo a las reglas programadas.
- (5) Proporcionar ayudas de consulta, con diálogos expertos y complementos gráficos.
- (6) Trabajar en un modo de simulación para realizar simulacros de fallas y recuperación de las mismas.
- (7) Prueba de reglas especificadas por el operador, para armar el sistema o integrar islas.

Podría pensarse que un sistema experto de este tipo no es prioritario, por su uso afortunadamente eventual. Sin embargo, la tarea (6) justifica plenamente los esfuerzos de investigación y posterior desarrollo de este sistema experto.

3.1.3 Experto en la restauración del sistema de distribución de energía.

La restauración de sistemas de distribución de energía¹⁹ (SDE) es otro campo de aplicación de los SE. Su objetivo es disminuir los tiempos de interrupción de servicios, aspecto significativamente importante, ya que en condiciones de disturbios se dejan sin alimentación un gran número de usuarios. Las premisas fundamentales de la restauración de la red son:

- (1) Identificar las zonas con falla.
- (2) Aislar las zonas sanas.

- (3) Restaurar los servicios, buscando el apoyo de alimentadores vecinos, considerando los aspectos de capacidad y confiabilidad.
- (4) Proporcionar una IHM de ayuda máxima en el proceso de restauración, con diálogos expertos y ayudas gráficas de localización de fallas.

Se propone una estructura modular para el sistema como sigue:

- (1) Localizador. Diagnóstico de fallas y localización de las mismas.
- (2) Restaurador. Realizar los aislamientos de zonas sanas y la restauración óptima de los servicios.
- (3) Interfaz hombre máquina. Comunicación con el operador.

Algunas reglas para este experto se dan a continuación:

REGLA 1.

SI

alimentador_ID_estado=desconectado

Y

operó protección tipo

ENTONCES

alimentador_ID desconectado por falla

DONDE

(tipo=instantanea, tiempo)

REGLA 2.

SI

alimentador_ID_estado=desconectado

Y

operó recierre N veces

Y

alimentador_ID estado=conectado

ENTONCES

localizar zonas desconectadas

REGLA 3.

SI

seccionador K_1 _alimentador_ID_sensor= n cuentas

Y

seccionador K_2 _mismo alimentador_sensor= $(n-1)$ cuentas

Y

estados (K_1 =desconectado, K_2 =conectado)

ENTONCES

alimentador_ID falla_zona_X.

Para la integración de este experto al sistema SCADA se sugiere usar el principio de sistemas distribuidos, enlazando a éste con un sistema adicional basado en microcomputadoras¹⁹, según puede apreciarse en la figura 3-5. Con esta opción se considera factible satisfacer la rapidez de respuesta requerida para tiempo real.



Figura 3-5 Experto en la restauración de un SDE.

3.1.4 Experto en el entrenamiento.

El experto en el entrenamiento de operadores, se ha sugerido para su integración en los sistemas de control en tiempo real²⁰.

La idea es aprovechar la misma computadora del centro de control, con una IHM mínima dedicada a esta tarea. Los equipos de entrenamiento deben ser idénticos a los empleados normalmente por el operador. El SE manejaría en un modo de simulación los diversos programas de control del sistema eléctrico, permitiendo sesiones expertas de entrenamiento. Además, se generarían situaciones o problemas, permitiendo la realización de acciones del operador.

3.2 Expertos de control de tensión y potencia reactiva

Desde hace ya varios años se ha trabajado en forma importante en la solución del problema del control de tensión y potencia reactiva, a fin de lograr un perfil de tensión adecuado del SEP. Para mantener a estas variables de estado en el rango de operación correcto, es práctica común la aplicación de medios de control actuando sobre generadores, transformadores con cambiadores de derivación, capacitores en derivación y reactores en derivación.

Recientemente, se han propuesto las técnicas de IA, específicamente las de sistemas expertos del conocimiento, en métodos de solución y/o ayuda del problema de control de tensión. Algunos sistemas interesantes reportados enfocan sus objetivos al control operativo guiado²¹, la asistencia en la toma de decisiones²², formulación de los problemas para su solución por algoritmos especializados²² y predicción del comportamiento del vector de estado del SEP²³.

Ante un determinado problema, el operador deberá decidir que recursos convendrá utilizar. A veces su experiencia le permitirá realizar la toma de decisiones rápidamente, pero cuando el problema es grave el proceso de toma de decisiones no es simple y frecuentemente se requerirá de algoritmos especiales que lo auxilien en la solución de los problemas. Los algoritmos más comúnmente empleados son el análisis de sensibilidad y los flujos óptimos.

Los problemas de control de tensión se pueden clasificar según la figura 3-6.

Clasificación de problemas de control de tensión	rutinarios	Deficiencias de la red. Se presentan cotidianamente
	Contingencias	Alguna(s) variables estado salen de su(s) límites operativos (emergencia)

Figura 3-6. Clasificación de los problemas de control de tensión, según su severidad.

Los problemas del tipo rutinario se resuelven por la aplicación de reglas empíricas basadas en la experiencia del operador y para las contingencias se recomienda el auxilio de los algoritmos mencionados. La aplicación de SE puede ser una ayuda notable en la solución de los problemas de control de tensión o cuando menos ayudar en la formulación de los mismos, a fin de aplicar eficientemente los paquetes de programación disponibles.

3.2.1 Operación guiada basada en el conocimiento

La idea del método²¹ está basada en el uso del conocimiento sobre el estado del sistema, los dispositivos de control, reglas operativas, la experiencia del operador y otros requerimientos de la operación corriente del sistema. Se pretende que este método guíe al operador para que pueda fácilmente obtener un procedimiento operativo, el cual, sin este sistema, podría encontrarse sólo después de diversos intentos a base de prueba y error.

3.2.1.1 Características del método.

- (1) El estado del sistema se discretiza dependiendo de los niveles de tensión de los nodos en normal, alerta y emergencia, de acuerdo con la figura 3-7. Cada nivel se subdivide en intervalos de igual valor, caracterizando a cada uno según el conjunto de enteros $(-i, +i)$, como se muestra en la misma figura.
- (2) El cambio de tensión después de la operación de un dispositivo de control se define usando relaciones de sensibilidad, que dependen solamente de la topología de la red.
- (3) La operación de cada dispositivo de control genera un estado de transición del estado del sistema, el que es simbólicamente simulado, limitándose a aquellas ramas que el operador consideraría normalmente.
- (4) El procedimiento de operación apropiado se determina por búsquedas en un diagrama de estados de transición.

(5) El estado del sistema es definido por los valores discretos, dependiendo de cada nivel de las tensiones de los nodos. Las acciones del operador se deberían basar en los estados operativos del sistema, siendo posible que se tengan diversos criterios de clasificación. Un criterio posible para identificar el estado del sistema es:

-- Cuando cada nivel de tensión de los diferentes nodos es normal, se entiende que el estado del sistema es normal.

--- Cuando uno o más niveles de tensión de los diferentes nodos están en emergencia, se entiende que el estado del sistema es anormal.

-- Cuando uno o más niveles de tensión están en alerta y los otros están normales, el considerar que el sistema se encuentre o no en estado normal dependerá de las condiciones pasadas, presentes y futuras del mismo.

(6) Cuando el operador reconozca que el estado del sistema es anormal, efectuará las acciones de control para regresar el sistema al estado normal.

(7) El sistema es interactivo, propone la secuencia de dispositivos de control para resolver los problemas.

Relaciones del método.

La BD del método propuesto puede identificarse en función de un conjunto de relaciones, obtenidas de la discretización de las variables de estado, las características de sensibilidad y del proceso simulado de las acciones de control, identificadas en un proceso de búsqueda de la solución de un problema que se presente.

Estados.

De la figura 3-7, se plantea la siguiente relación, a la que se le da una estructura general.

$$\begin{aligned} & \text{Estado}(n, \text{condición}(i_1, i_2, \dots, i_n), \\ & \text{totales}(ne^b, na^b, na^*, ne^*), \quad (3-1) \\ & \text{control}, \dots) \end{aligned}$$

Donde:

n_j = Número de estado. Se incrementa cada vez que se simula una acción de control, en las secuencias analizadas.

$\text{condición} = C$ = sus argumentos implican la condición de cada uno de los voltajes de los nodos (n). Por ejemplo, para el k -ésimo nodo, si $V_k = i_k = -5$, significa que éste se encuentra en e^b (emergencia bajo).

$\text{totales} = T$ = sus argumentos implican el número total de nodos en cada uno de los estados, sin incluir los normales. Si $ne^b = 3$, quiere decir que tres nodos están en el estado de emergencia bajo.

$\text{control}, = DC_1$ = Una lista de dispositivos de control aplicables al estado actual. Se debe actualizar cada vez que se determine un nuevo estado.

LRB		LOB			LNB		LNA		LOA		LRA			
(e ^b)		(a ^b)			(n)		(a ^a)		(e ^a)					
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7

Donde: (LNB, LNA) = [límite normal (bajo, alto)]

(LOB, LOA) = [límite operación (bajo, alto)]

(LRB, LRA) = [límite razonabilidad (bajo, alto)]

n = normal

(a^b, a^a) = [alarma (bajo, alto)]

(e^b, e^a) = [emergencia (bajo, alto)]

Figura 3-7. Estados y caracterización de niveles de tensión

Dispositivos de control.

La transición de un estado del sistema a otro se produce por la operación de los distintos medios de control. El cambio de tensión después de la operación de un dispositivo de control se describe por el número de pasos que se logran según la figura 3-7. La relación que caracteriza a estos efectos de control es:

$$\text{Dispositivo}[\text{N}_a, \text{cambio}(\text{nt}_1, \text{nt}_2, \dots, \text{nt}_n), \text{límites}] \quad (3-2)$$

donde:

N_d = número de dispositivo

cambio = C = sus argumentos dan el cambio de las tensiones de la relación de estados, después de una operación de control. Los cambios se dan en números de pasos que se logran, de acuerdo con la relación de sensibilidad. Si por ejemplo, $nt_1 = 3$, $t_1 = 4$ y el control se aplica en sentido negativo, en el nuevo estado $t_1 = t_1 - nt_1 = 4 - 3 = 1$.

Relación de transiciones.

El control de las transiciones de estado se realiza mediante una relación que permite realizar movimientos en un diagrama de transiciones. Esta relación es:

Rama[N_i, N_f , operación(N_d, d_c)] (3-3)

donde:

(N_i, N_f) = punto de inicio y final de la rama

operación = sus argumentos se refieren al número de dispositivo de control y a la dirección de control aplicado (+ o -).

3.2.1.2 Estrategia de control.

La estrategia de control se basa en lo siguiente:

- (1) La operación de cada dispositivo de control genera un estado de transición.

- (2) Se construye un diagrama de estados de transición aplicando los dispositivos de control, uno después de otro, a los estados generados, ver figura 3-8.
- (3) Se determina un procedimiento operativo apropiado, realizando una búsqueda en el diagrama de transición.
- (4) Se determina si los estados de transición son aceptables para lo cual se usan las reglas del conocimiento (operativas, experiencia del operador y otros requerimientos). Algunas reglas sugeridas son:

Regla 1. Si una o más condiciones de tensiones de nodos se encuentran en emergencia, las ramas en el diagrama de transiciones se restringen a aquellas cuyos estados terminales disminuyen las emergencias.

Regla 2. Si cualquier condición de tensión inicial no es emergencia, las ramas del estado de transición se limitan a aquellas cuyos estados disminuyan el número de estados de alerta y no provoquen emergencias.

Esta estrategia de control se aplica según el algoritmo que se plantea a continuación.

3.2.1.3 Algoritmo.

1. Obtener un nuevo estado del sistema, simulando una operación en cada dispositivo de control aplicable en este estado.

- 1.a. Considerar el estado actual

Estado[N₁,C(.....),T(.....),DC₁]

1.b Mientras se tengan dispositivos en DC₁, simular su operación aplicando la relación:

Dispositivo[N_a,cambio(.....),límites]

1.c Actualizar la relación estado.

1.d Actualizar la tabla DC₁, de acuerdo con la tabla límites.

2. Determinar los nuevos estados aceptables, usando las reglas del conocimiento.

3. Agregar los estados aplicables a la base de datos.

4. Obtener la siguiente relación con estados anormales; si existe y quedan dispositivos de control aplicables regresar al paso 1, sino terminar.

3.2.1.4 Control de los estados de transición.

Para realizar el control de los estados de transición se hace una búsqueda de un procedimiento operativo, construyendo un diagrama de transición de estados. El operador puede en forma interactiva seleccionar un procedimiento apropiado según el estado actual del sistema y los dispositivos disponibles. El sistema experto indicará la secuencia de dispositivos a aplicar y su secuencia para que el estado del sistema sea normal. Además, se le podrán solicitar secuencias alternas de control en las que el sistema opere en un estado de alerta alto o alerta bajo.

3.2.1.5 Diagrama de transición de estados.

Las relaciones de estados, de dispositivos y ramas se utilizan para construir el diagrama de transición de estados. La figura 3-8 muestra este diagrama.

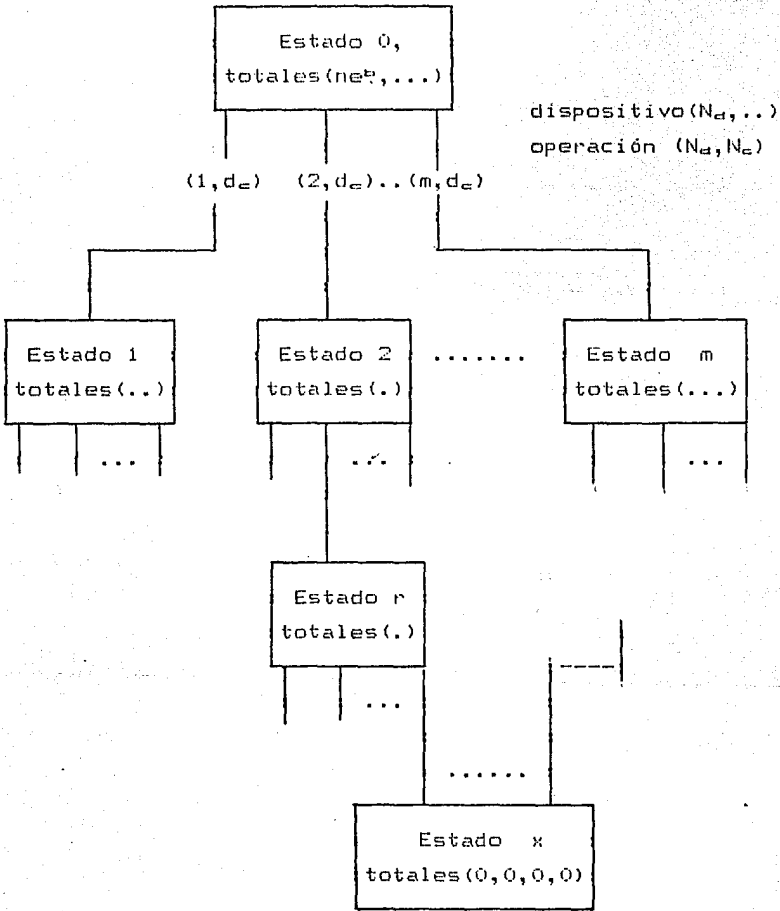


Figura 3-8. Diagrama de transición de estados

3.2.2 Experto de asistencia en la toma de decisiones

Este sistema experto de control de tensión y potencia reactiva puede operar en dos modos, dependiendo de la severidad del problema, rutinarios o contingencias²². En el primer modo la aparición de una violación "ligera" se resuelve con el experto propuesto, el cual asiste al operador en la toma de decisiones y ante la detección de una contingencia, dará las facilidades para formular el problema el que se solucionará aplicando algún algoritmo numérico disponible. La figura 3-9 representa la arquitectura del sistema en cuestión.

La BC del sistema se divide en este caso en dos partes. Una formada por las reglas que permitan la detección de los problemas de tensión y la búsqueda de las acciones de control basadas en reglas empíricas de conocimiento. Si se determina que el problema es lo suficientemente serio, por lo que las reglas empíricas pueden resultar poco confiables, se usa una segunda parte de la BC con la que se formula el problema para su solución por un programa de aplicación.

3.2.2.1 Características del método

- (1) Si una tensión en un nodo de carga cae o supera los límites operativos, es más eficiente aplicar una compensación local de reactivos. Si la compensación local es insuficiente los compensadores más cercanos deben aplicarse para resolver el problema.
- (2) Si se tiene baja o alta tensión en un nodo y se ejerce control sobre el cambiador de derivaciones de los transformadores, las tensiones de otros nodos podrían violar sus límites operativos.
- (3) Las tensiones en los nodos de generación pueden subirse o

bajarse para corregir problemas en otros nodos de carga.

(4) Ante problemas de control rutinarios o poco severos las reglas (1) a (3) pueden ser aplicadas para corregirlos.

(5) Si se presenta una contingencia más severa o los problemas de control de cualquier tipo se extienden por zonas distintas se debe aplicar el paquete de programación especializado.

(6) En base a los niveles de violaciones, los índices de severidad son:

S = 0 Condición normal. Ninguna violación de límites.

S = 1 Condición alerta. Violaciones ligeras de un límite en uno o dos nodos.

S = 2 Condición emergencia. Violación severa en un nodo o más de dos límites son violados y los dispositivos de control locales o cercanos son suficientes.

S = 3 Extrema emergencia. Igual que el caso anterior sólo que los dispositivos son insuficientes.

(7) Para S = 1 se aplican las primeras tres reglas. Para S=2 o S = 3, se propone lo siguiente:

7.a Si S = 2 el algoritmo de control debe minimizar el uso de dispositivos de control.

7.b Si S = 3 un algoritmo de despacho de potencia reactiva deberá utilizarse para resolver el problema lo más

pronto posible.

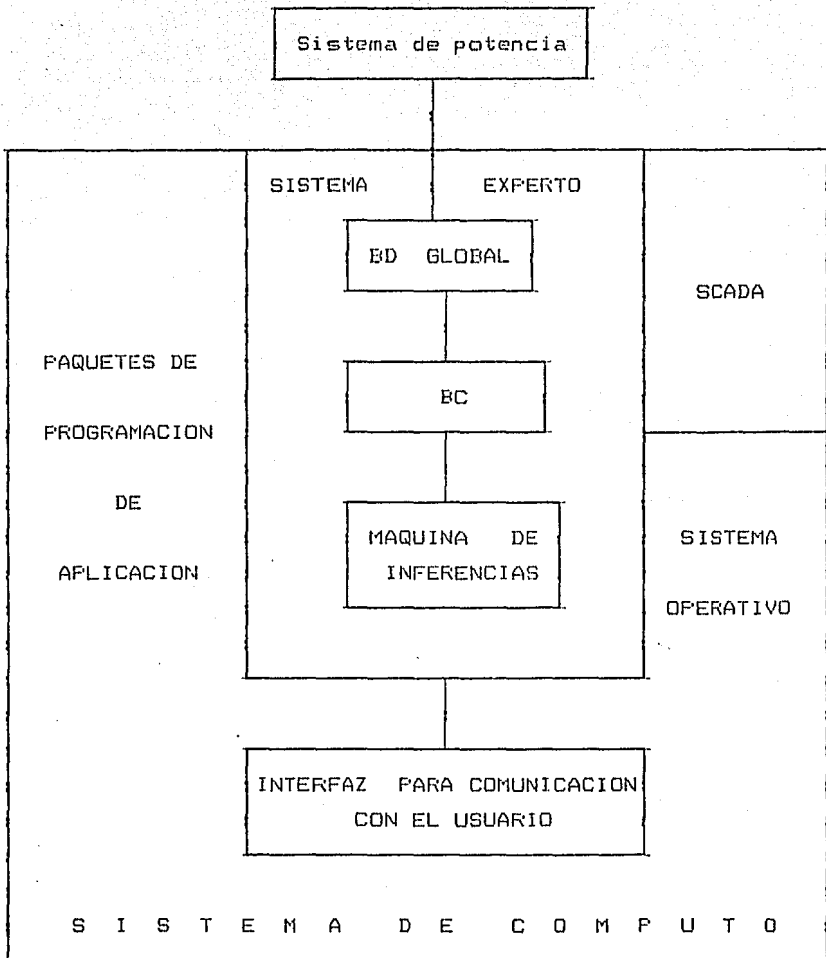


Figura 3-9. Configuración del sistema experto de asistencia en la toma de decisiones.

3.2.2.2 Reglas de producción

Como se indicó, la BC se puede ver dividida en dos partes, una que contiene las reglas aplicables a la solución de problemas rutinarios y la otra enfocada a problemas más graves.

A continuación se presentan unos cuantos ejemplos de las reglas de producción para las dos partes del conocimiento:

Regla 1.a

Si una tensión en un nodo de carga V_i está en la región a^b o a^* , ver figura 3-7, y no se han detectado otras violaciones, entonces calcular su desviación $(1-V_i)pu$ y señalar este nodo en estado de alerta alto o bajo.

Regla 2.a

Si una tensión en un nodo de carga V_i vuelve a la región normal, entonces modificar su identificación y verificar la situación con un flujo de carga.

Regla 3.a

Si la desviación de una tensión σV_i de un nodo en estado a^* o a^b y el compensador local está disponible, entonces calcular el máximo incremento o decremento de tensión.

$$\sigma V_i^{max} = d_{ij} \sigma U_j \quad (3-4)$$

donde:

d_{ij} = parámetro de sensibilidad correspondiente al efecto del control aplicado.

σU_j = es la contribución (positiva o negativa)

debido al dispositivo de control.

σV_{max} = es el máximo incremento de tensión.

Regla 4.a

Si un compensador proporciona el control requerido, entonces realizar la compensación necesaria.

Regla 1.b

Si hay más de dos nodos fuera de la región normal (ver figura 3-7), entonces determinar el índice de severidad.

Regla 2.b

Mientras más de dos tensiones de nodos estén fuera de la región normal de operación el clasificar el estado del sistema como emergencia o extrema emergencia.

Regla 3.b

Si los medios de control disponibles, locales o cercanos no son suficientes para resolver la contingencia, entonces $S=3$ y entrar al modo de ayuda para formular el problema según la severidad determinada.

Regla 4.b

Si los medios de control disponibles, locales o cercanos son suficientes para resolver la contingencia, entonces $S=2$ y entrar al modo de ayuda para formular el problema según la severidad determinada.

Podrá notarse que las reglas tipo a y tipo b caracterizan la severidad del problema y por consiguiente los dos modos de

operación del método. Si $S=2$, el problema puede solucionarse de diversas formas, una de las cuales se basa en la formulación con una función objetivo que minimice la aplicación de los recursos de control.

$$\min f(\sigma U, \sigma t) = (\sum_j^k \sigma U_j + \sum_s^r \sigma t_s) \quad (3-5)$$

S.a.

$$V_i^m \leq V_i^b + \sum_j^k d_{ij} \sigma U_j + \sum_s^r c_{is} \sigma t_s \leq V_i^M \quad (3-6)$$

$$i \in \{1, \dots, n\} \quad j \in \{1, \dots, k\}$$

$$t_s^m \leq t_s^b + \sigma t_s \leq t_s^M \quad (3-7)$$

$$s \in \{1, \dots, r\}$$

$$U_j^m \leq U_j^b + \sigma U_j \leq U_j^M \quad (3-8)$$

donde los conjuntos:

i = nodos del sistema

j = nodos con medio compensador

s = nodos con cambiadores de derivación

y

(d_{ij}, c_{is}) = son los factores de sensibilidad.

El modelo anterior corresponde a un sistema de programación lineal. En éste los costos de utilizar los recursos de compensación son iguales. Un modelo alternativo consistiría en penalizar en la función objetivo a los recursos para su empleo más eficiente.

Para una observación final respecto a este SE se hace referencia a la figura 3-9. En ésta se observa al SE incluido en un

sistema de cómputo orientado a la operación del SEP, con los programas de aplicación requeridos para resolver las severidades de problemas correspondientes a los índices $S=2$ y $S=3$. Además se indica también la funciones de soporte SCADA y IHM. La importancia de esta observación es que para que un SE como este tenga éxito, se debe implantar tomando en cuenta el medio en que operará (figura 2-3). La función SCADA es desde luego fundamental en el problema de control de voltaje ya que realiza la detección de las violaciones. También, por lo que respecta a la IHM las vistas del usuario deben utilizar diálogos expertos, similares a las propuestas en las figuras 3-3 y 3-4.

3.3 Seguridad del sistema eléctrico de potencia.

Los sistemas híbridos conjuntando algoritmos numéricos y sistemas expertos se recomiendan²⁴ para la selección de contingencias, la simulación de los efectos de éstas y la interpretación de los resultados obtenidos.

La evaluación de contingencias en línea involucra en general los aspectos siguientes:

- (1) Selección de un caso base y preparación de sus datos.
- (2) Selección de las contingencias, i.e, los libramientos no planeados de uno o más elementos del SEP.
- (3) Simulación de las contingencias, i.e, determinar el efecto de cada contingencia de acuerdo al caso base.
- (4) Interpretación de resultados por los operadores del sistema.

Por tratarse de una evaluación en línea, el estado operativo corriente del SEP se emplea como caso base, coleccionando automáticamente los datos del sistema de control. Las contingencias por evaluar son obtenidas de una lista, configurada con la intervención de un experto humano, en un proceso fuera de línea. En ocasiones, unas cuantas contingencias pueden especificarse, según necesidades del operador. La evaluación de contingencias se refleja finalmente por violaciones de los límites operativos de las variables del SEP.

La participación de un SE en la evaluación en línea de la seguridad del SEP, ayudaría notablemente al operador en los aspectos (2) y (4), considerados difíciles de realizar con rapidez ya que las listas son grandes y pueden obtenerse demasiadas violaciones. A fin de ejemplificar el empleo de SE en este campo, se presenta adelante un método de predicción de variables del SEP, sujetas a una posible contingencia.

3.3.1 Predicción de contingencias.

El reconocimiento de patrones se ha empleado en el análisis del sistema de potencia para la solución de diversos problemas. La predicción de tensión²³, aplicando esta técnica, se sugiere como un método computacional rápido que puede usarse incluso en un ambiente de tiempo real. Para desarrollar un sistema como éste, se deben cubrir los aspectos funcionales mostrados en el diagrama a bloques de la figura 3-10. En este se observan:

(1) Identificación de variables características.

(2) Creación de una BD de estudios.

(3) Identificación de un estado predisturbio.

(4) Reconocimiento de patrones.

(5) Predicción del estado postdisturbio.

(6) Interfaz hombre máquina.

3.3.1.1 Identificación de variables características.

Las variables características pueden ser: (1) las tensiones y ángulos de nodos, (2) las inyecciones de potencia real y reactiva nodales y (3) Un conjunto híbrido combinando las variables anteriores. Sin embargo, el conjunto de variables características no debe ser de cardinalidad muy grande, ya que la sobrecarga computacional en el reconocimiento de patrones es un proceso muy costoso en tiempo. Para la selección de las variables se recurre al conocimiento de los expertos en la operación del sistema eléctrico o bien a un método científico, tomando en cuenta la correlación de variables.

3.3.1.2 Base de datos de estudios.

Se forma de un conjunto de matrices $n \times m$, en las que la dimensión n la fija el número de variables características y la m es el número de patrones contenidos en cada una de las matrices de la BD de estudios. Cada una de las matrices del conjunto son requeridas para cada caso o contingencia que modifi-

que el estado de las ramas de la red.

A cada patrón en las matrices se le asocia un flujo de potencia (caso base) y una serie de contingencias estudiadas a partir de ese caso base. Los datos del caso base y de las contingencias son integrantes también de la BD.

Para la selección de las contingencias se recurre de nuevo al conocimiento de los expertos de operación, debiendo considerar aquellas que sean más severas, de tal forma que se evalúen solo un conjunto pequeño de éstas, las que cubrirán otras de menor severidad. Para que el reconocimiento de patrones sea confiable, la BD de estudios debe contener patrones representativos, semejantes a los estados de predisturbio más probables.

De lo anterior, se comprende la necesidad de aplicar un gran esfuerzo para la creación de la BD de estudios, ya que el número de corridas de flujos de potencia es extremadamente elevado. Por ejemplo, para una matriz con 64 patrones ($m=64$), 6 flujos por patrón (el caso base más cinco contingencias), implican 384 estudios²³. Entonces, para una BD que incluya cinco matrices como ésta requiere de 1620 estudios de flujos fuera de línea.

3.3.1.3 Reconocimiento de patrones.

El método empleado para el reconocimiento de patrones se basa en la localización de los N vecinos más cercanos. Para lograr la localización, se calculan las distancias Euclidianas que se tienen entre el estado predisturbio y cada patrón de la matriz correspondiente de la BD.

Las distancias Euclidianas se calculan por:

$$S_i = [W_1(X_{1i} - X_1)^2 + \dots + W_n(X_{ni} - X_n)^2]^{1/2} \quad (3-9)$$

donde:

S_i = distancia Euclidianas entre el estado predisturbio y el i -ésimo patrón de la matriz de estudios.

W_n = factor de peso para la n -ésima variable característica; se determina en forma empírica.

X_{ni} = valor normalizado de la n -ésima variable característica del i -ésimo patrón.

X_n = valor normalizado de la n -ésima variable característica del estado predisturbio.

3.3.1.4 Predicción del estado postdisturbio.

En base a la localización de los N vecinos más cercanos, de acuerdo con las distancias calculadas S_i , se procede a calcular la predicción del estado postdisturbio. A continuación se da la fórmula para el caso de tensiones.

$$V_{kj}^t = V_{ko}^t + \left[\sum_i^n (1/S_i)^M \sigma V_{ij}^t \right] / \left[\sum_i^n (1/S_i)^M \right] \quad (3-10)$$

donde:

V_{kj}^t = predicción de tensión postdisturbio en el k-ésimo nodo para la j-ésima contingencia.

V_{ko}^t = tensión predisturbio en el k-ésimo nodo.

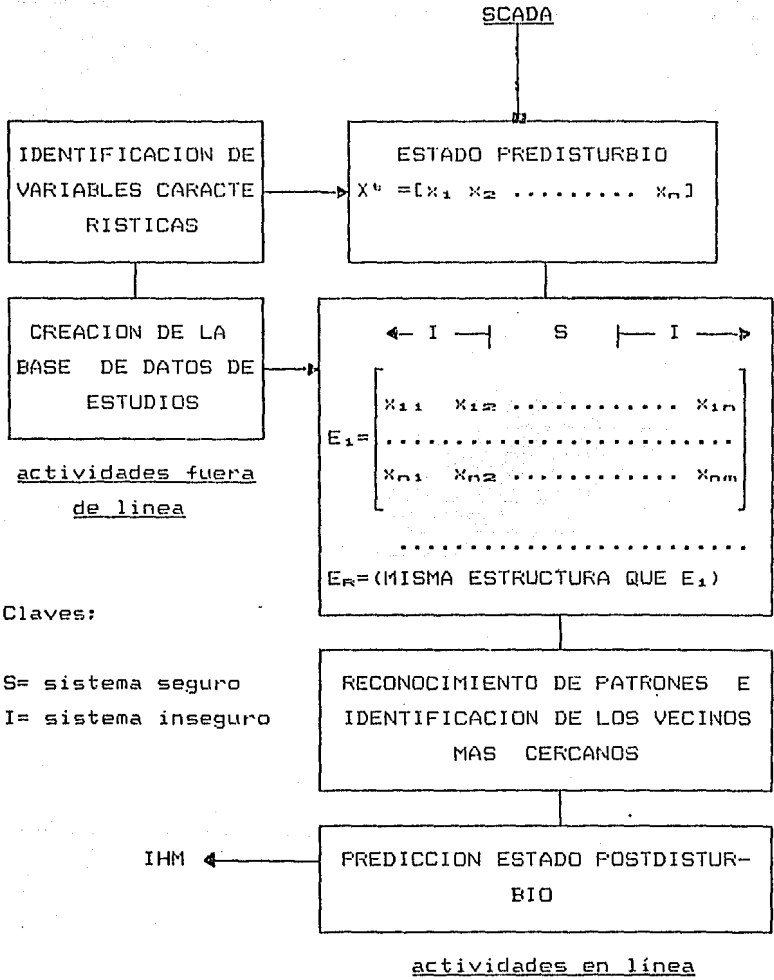
N = número de vecinos más cercanos que se desean considerar.

M = factor de peso para el inverso de la distancia S_i .

Si es mayor que uno, implica que las distancias más cercanas tienen más peso.

σV_{ij}^t = desviación de tensión del k-ésimo nodo para la contingencia j, respecto al vecino más cercano.

Los estados patrones pueden aglomerarse de manera que sea posible identificar fácilmente si el estado del sistema es seguro o inseguro. En la misma figura 3-10 se han identificado, en la matriz, los grupos de columnas de estados seguros e inseguros (S=seguro y I=inseguro).



Claves:

S= sistema seguro
I= sistema inseguro

Figura 3-10 Diagrama de funciones.

4. CONTROL EN TIEMPO REAL DEL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

4.1 Control del sistema interconectado nacional.

El sistema eléctrico interconectado nacional (SIN) está constituido por seis áreas de control. Adicionalmente, se tienen en el país otras dos áreas aisladas localizadas en las penínsulas de Baja California y Yucatán. Ver figura 4-1.

A fin de lograr una operación de buena calidad, segura y económica, se dispone de una estructura de control jerárquica, en base de un centro nacional de control (CNC), y seis centros de control de área (CCA). Ver figura 4-2.

Los sistemas de control de las seis áreas eléctricas del SIN se han implantado bajo estructuras funcionalmente gemelas, por lo que es suficiente tratar una de éstas. Se ha elegido tomar como modelo al área eléctrica central, por ser la más importante de las seis. Ver figura 4-3.

Los sistemas de control del SIN forman dos niveles jerárquicos de cómputo, cada uno con redundancia completa, con un elemento en espera, como sigue:

- (1) El nivel jerárquico superior o centro coordinador está estructurado en dos subniveles conjuntando cuatro computadoras. El primero de estos, denominado preproceso, es el frente de enlaces con los seis CCA, maneja la IHM y distribuye la información a una BD residente en memoria compartida. El segundo subnivel, denominado proceso, realiza las funciones de aplicación para operar el SIN en forma segura y económica.

- (2) El nivel jerárquico inferior lo constituyen los centros de

control de área, con sistemas de cómputo independientes, también duales. Este nivel se encarga de obtener la información de la red eléctrica y realizar las acciones de control a través de terminales remotas, localizadas en las subestaciones y plantas. Los nodos que forman el modelo de cada área de control se escogieron considerando la topología de la red del SIN y las políticas operativas de cada área.

El CCA central cuenta con otro importante sistema de control, también dual, que se encarga de manejar parcialmente la red de subtransmisión y distribución, realizando funciones de control remoto y adquisición de datos, SCADA, de un conjunto de instalaciones carentes de operadores locales.

4.1.1 Centro nacional de control.

El diagrama a bloques de la figura 4-4 representa el esquema de control del CNC. Como puede apreciarse involucra dos subniveles con redundancia completa; el preproceso y el proceso. Estos subniveles se comunican a través de memoria compartida, también con redundancia.

El sistema está estructurado con 4 computadoras H500, palabra de 24 bits, con 384 kpalabras en c/u de proceso y 256 kpalabras en c/u de preproceso. El subnivel de proceso cuenta con unidad científica con punto flotante, no así el otro subnivel. Se dispone de sistemas operativos para tiempo real y compiladores FORTRAN77, BASIC y PASCAL. Tiene 4 unidades de discos, con 300 Mbytes c/u.

El subsistema de programación incluye programas de tiempo real para la operación del SIN, considerando que las seis áreas

comparten un fin común, asignándole a este centro coordinador las responsabilidades de:

- (1) Coordinación de intercambios de bloques de energía entre las áreas.
- (2) Programación de los recursos de generación y despacho económico de la misma.
- (3) Evaluación de la seguridad del sistema nacional.

Para cumplir los objetivos generales anteriores, se recibe en el CNC, periódicamente o por demanda, la información de la red eléctrica, la cual es enviada por los centros de control de las áreas. Asimismo, la transmisión de información en el sentido opuesto es también realizada.

Varios tipos de datos fluyen a través de los enlaces entre las computadoras (CNC-CCA): (1) datos de la red, (2) desplegados, (3) resultados de los programas de aplicación, etc. El CNC no se comunica con los equipos terminales instalados en subestaciones y plantas, ya que la adquisición de datos y control se realiza por los CCA.

El tráfico de datos entre los niveles se resume en las tablas 4-1 a 4-3. En éstas se indican parámetros importantes como son el tipo de información, la frecuencia de envío, y la cantidad de datos.

La estructura del CNC se ha diseñado para operar con dos o más sistemas eléctricamente separados (islas), incluso en forma permanente. Esto se logra ya que una vez que en cada isla se obtiene el equilibrio capacidad-carga, las funciones de aplicación se pueden procesar separadamente para cada una.

Las funciones de aplicación del CNC son de dos tipos: (1) pro-

cedentes del fabricante del equipo (HARRIS) y (2) desarrollos nacionales (IIE)²⁷. Las del primer tipo son:

- (1) Ejecutivo de programas de análisis de la red (NAPS).
- (2) Análisis de seguridad en tiempo real (RTSA).
- (3) Estudios y análisis de la red (STNA).

Estas funciones se soportan por los siguientes programas:

- Configurador de la red (CR). Detecta la formación de islas y asocia los elementos del SIN a cada una de éstas.
- Estimador de estados del sistema (ES). Procesa las mediciones de tiempo real del SIN en estado estable. Crea una BD mejorada para su uso por otras funciones. Las variables de estado seleccionadas son la magnitud de tensión y el ángulo de cada nodo de la red considerada. El algoritmo utilizado corresponde al método de mínimos cuadrados pesados²⁸ (WLS).
- Análisis de seguridad (AS). Su propósito es evaluar la seguridad del SIN bajo configuraciones corrientes de la red (tiempo real) o anticipadas (estudio) y el estado operativo del mismo. La seguridad se evalúa con base en violaciones de límites y sus efectos potenciales en la operación en estado estable, lo cual puede resultar de un conjunto simulado de contingencias. Cada contingencia la originan salidas de elementos del sistema como líneas, transformadores, generadores y cargas o una combinación de ellos.
- Reducción de la red (RR). Su función es reducir la dimensión del modelo del SIN usado en el análisis de se-

guridad. Su uso principal es la creación de la red equivalente del sistema externo (vecinos). Las interacciones con el sistema externo son reflejadas por medio de los equivalentes en los nodos frontera.

-- Flujos de carga del operador (FCO). Herramienta de estudio de uso frecuente por el personal de operación; ayuda en el análisis de situaciones postuladas. Al seleccionar estratégicamente la base de datos para el estudio, el operador puede obtener condiciones cercanas a las de tiempo real y las condiciones pasadas o futuras. El algoritmo utilizado es el método desacoplado rápido²⁹. Los tiempos de ejecución y requerimientos de almacenamiento de datos se optimizan usando técnicas de esparcidad y ordenamiento.

Otras funciones de aplicación del sistema, tipo 1, son:

- (4) Cálculo de los costos de producción. Su finalidad es determinar los costos horarios de producción para la generación térmica, del sistema nacional y de cada una de las áreas separadamente. La función se ejecuta cada cinco minutos. Los valores telemididos a la salida de las plantas, que son recibidos en el CNC cada 30 segundos, se promedian con base en los cinco minutos para obtener los costos horarios.
- (5) Supervisión de la reserva. Suministra la información de la reserva operativa disponible en el sistema. La función se ejecuta cada 15 minutos o bajo demanda, calculando parámetros que definen la reserva del sistema y probando posibles violaciones o necesidades predefinidas de reserva, tomadas por región, por área y por sistema.
- (6) Reportes del sistema. Proporciona los reportes del CNC. Se cuenta con reportes:

- Diarios de datos horarios,
- semanales de datos diarios,
- mensuales de datos diarios y
- simultáneos.

Las funciones del tipo 2 integradas al sistema son:

- (7) Despacho económico restringido (DER). Relacionado con NAPS. Minimiza el costo total de generación real, considerando las restricciones de la red eléctrica a nivel de transmisión y la configuración multiárea del SIN. Se toman en cuenta las pérdidas incrementales de transmisión en el proceso de optimización. El algoritmo utiliza la programación lineal, con la descomposición de Dantzing-Wolfe.

El DER calcula:

- El punto base de operación económicamente óptimo y los factores de participación económicos, para todas las unidades, cada una representada por una curva de costos incrementales de producción. Para participar en el cálculo económico, las unidades deben estar en un estado identificado como "despachable".
- El valor base o intercambio neto programado deseado de cada área.

Las restricciones que se consideran²⁷ en el cálculo son:

- Límites de flujos de potencia real en líneas/transformadores seleccionados, entre áreas o internas,
- intercambio neto de potencia real en cada área,
- reserva rodante del área y margen de regulación y

-- reserva rodante de grupos de plantas.

- (8) Cálculo automático de intercambios (PCAI). Su propósito es calcular el programa de intercambios netos para cada área. Corre cada cuatro segundos y mantiene la frecuencia y el intercambio externo neto del sistema dentro de tolerancias establecidas. Los valores de los intercambios calculados son transmitidos a los CCA cada cuatro segundos, para que éstas realicen el control automático de generación (CAG).
- (9) Coordinación hidrotérmica a corto plazo. Su función es obtener un programa de generación de las plantas hidroeléctricas de tal forma que los costos de producción de las termoeléctricas se minimicen. El programa de generación se obtiene para un período de siete días. Los primeros dos días se forman en base horaria y los últimos cinco días en base hexahoraria. Normalmente el programa se ejecuta por comando del operador, debiéndole alimentar los datos de los escurrimientos y el pronóstico de demanda para ese período.

Para iniciar/detener las funciones de configuración y análisis de seguridad, se aplican las siguientes condiciones.

- (1) Operación de interruptores ---> Configurador de la red
- (2) Cambio en la topología de la red ---> (1) Estimador de estados,
(2) DER,
(3) Análisis de seguridad con equivalentes.
- (3) Operación de interruptores durante la ejecución de la secuencia iniciada ---> La ejecución se suspende y NAPS pone en ejecución el configurador de la red.
- (4) Arranque y paro por comando ---> Interacción del operador a través de la IHM.

Además de las condiciones establecidas, la secuencia se inicia con cualesquiera de los siguientes eventos:

- (5) Cuando una variable de estado falla una prueba estadística que mide la compatibilidad entre el nuevo conjunto de mediciones y el estado disponible.
- (6) Cuando una área experimenta una situación donde su margen de regulación no excede un mínimo.
- (3) Cuando el tiempo transcurrido desde la última ejecución ha excedido un tiempo predefinido por el operador, típico de 20 minutos.

4.1.2 Sistemas de control de área.

El diagrama a bloques de la figura 4-5 representa el esquema de control del CCA central, el cual se enlaza con el CNC a través de un canal de datos a 2400 Bd.

El sistema está estructurado con 2 computadoras H500, palabras de 24 bits con 704 kpalabras de memoria c/u, con iguales recursos en programación de soporte que el CNC.

Este sistema de administración de energía (EMS), se soporta, en la función básica SCADA. El conjunto de aplicaciones es el siguiente:

- (1) Control automático de generación (CAG). Se encarga de la regulación de las unidades generadoras que se encuentran bajo control para corregir el error de área, en base a la frecuencia programada e intercambio programado entre áreas con objeto de mantener los límites especificados.

- (2) Pronóstico de carga. Suministra los valores de demanda horaria y hexahorarios en MWH para cada área de control, para periodos de tiempo de hasta siete días de adelanto. Los resultados de las seis áreas interconectadas se transmiten al CNC donde se consolida el pronóstico a nivel nacional.
- (3) Supervisión de la reserva. Proporciona la cantidad de reserva disponible en MW para propósitos de control de generación/seguridad del SIN.
- (4) Análisis post-disturbio. Guarda en un archivo circular los datos predisturbio (5 minutos), adquiridos de las exploraciones, los cuales son congelados al ocurrir un evento seleccionado (disturbio). AL ocurrir ese evento disparador se recopilan los datos de las exploraciones de otros cinco minutos, creando la información post-disturbio. Esta función sólo forma archivos de datos "crudos" y no se cuenta con ayudas para el análisis del disturbio.
- (5) Tiro y restauración de carga. Proporciona los medios para realizar acciones de control remoto de grupos de interruptores mediante una sola petición del operador en la IHM. Supervisa y totaliza la carga correspondiente a cada grupo definido en el sistema, mostrando estos resultados en un desplegado para que se decida el grupo que conviene comandar.

La BD de este sistema de control contiene:

- 37 instalaciones (dimensionada para 120 terminales remotas, algunas instalaciones tienen más de una terminal).
- 2853 puntos digitales. Dimensionada para 6638.
- 1278 puntos analógicos. Dimensionada para 1700.

- 167 puntos de acumuladores. Dimensionada para 584.
- 120 analógicos calculados. Dimensionada para 425.
- 176 acumuladores calculados. Aun no usados.

Esta BD contiene solamente puntos de información de la red de transmisión/generación, ver figura 4-3. Sin embargo, en el mismo centro de control se opera la subtransmisión a través de otro sistema SCADA.

El sistema SCADA adicional, figura 4-6, supervisa y controla un conjunto de subestaciones de subtransmisión/distribución, enrutando la información al CCA y a tres centros de control de distribución. Además, debido a que este sistema se puso en servicio varios años antes que el sistema EMS, con varias subestaciones de la red de transmisión, se decidió conservar esta redundancia como respaldo del sistema más nuevo.

Sin considerar puntos futuros, la BD de este sistema contiene:

- 26 subestaciones.
- 3776 puntos digitales.
- 905 puntos analógicos.
- 329 puntos analógicos calculados.
- 122 puntos de acumuladores.

La información dinámica (sin considerar acumuladores) del CCA central es:

- 9261 puntos de información, actualizados en menos de un minuto. La mayor parte de digitales se obtienen en menos de 4 segundos y los analógicos en menos de 12 segundos.

clasificación	dirección	frecuencia	composición/cantidad
analógicos	CCA->CNC	30 seg	16 bits/punto; 1500 puntos (max/CCA) #
digitales	CCA->CNC	5 min	8 bits/punto; 1800 #
acumuladores	CCA->CNC	1 hora	16 bits/punto; 600 #
datos de CAG	NCC->CCA	4 seg	36 bits/valor EMSFP; 2#
datos del cálculo de inter-cambios	CCA->CNC	4 seg	36 bits/valor EMSFP, 24 bits/valor EMSINT; 3 EMSFP# y 2 EMSINT#
enlaces	CCA->CNC	4 seg	16 bits/punto; 12 puntos (típico) por CCA y 50#

Tabla 4-1. Tráfico del enlace de datos (periódicos).

clasificación	dirección	frecuencia	composición/cantidad
indicaciones de cambios estado	CCA->CNC	30 seg ^a	24 bits/punto; 40 puntos (max/CCA) #
desplegados de la terminal de operación (TRC)	CCA->CNC	20 min ^a	4000 bytes/desplegado (32 000 bits/desplegado)
^a se especifica sólo para fines de transmisión de datos			

Tabla 4-2. Tráfico del enlace de datos (aperiódicos).

clasificación	dirección	frecuencia	composición/cantidad
estimador de estados	CNC->CCA	15 min	36 bits/valor EMSFP; 2000 valores AFSFP (max/CCA)#(1300promed)
DER	CNC->CCA	15 min	36 bits/valor EMSFP, 24 bits/valor EMSINT; 3 val EMSFP y 2 val EMSINT; 50 unidades#.
costos de plantas térmicas	CNC->CCA	1 hora	36 bits/valor EMSFP, 24 bits/valor EMSINT; 2 val EMSFP y 4 val EMSINT por unidad; 50 unidades#
pronósticos	CCA->CNC	12 horas	384 palabras (24 bit)
límites operación unidades (alto/bajo)	CCA->CNC	1 hora	24 bits/valor EMSINT; 2 val EMSINT por unidad; 50 unidades#.
estados unidades	CCA->CNC	1 hora	8 bits/valor EMSST; 5 valor EMSST y 1 valor EMSST/unidad; 50#
supervisión de	CCA->CNC	1 hora	24 bits/valor EMSINT; 3 valor EMSINT#
<p><u>notas aplicable a las tablas 4-1 a 4-3:</u></p> <p>1. EMSFP= EMS punto flotante 2. EMSINT=EMS entero 3. EMSST= EMS estados 4. AFSFP=APS punto flotante</p>			

Tabla 4-3. Tráfico del enlace de datos (programas aplicación)

4.2 Catálogo de sistemas expertos para el sector eléctrico.

La IA aplicada en la operación de los sistemas eléctricos es un campo muy nuevo de investigación; sin embargo, se proponen a la fecha gran cantidad de sistemas, algunos ya implantados como prototipos, los que prometen dotar a los operadores con herramientas verdaderamente poderosas, ofreciendo una comunicación eficiente y amigable con la lógica de toma de decisiones del operador. Entonces, es valioso sugerir diversos sistemas expertos para su aplicación en este campo y contemplar la manera en que, algunos prioritarios, podrían integrarse en los sistemas de control del SIN.

En el capítulo 3 se trataron varios SE para el control de los SEP y SDE. Estos sistemas y algunos otros tratados en diversas fuentes²² pueden formar un catálogo de sistemas expertos para la operación de los SEP y SDE. También, en las funciones de aplicación de los CCA se explican dos de ellas que ofrecen ventajas muy pobres para la operación (4 y 5); en el catálogo que se propone iniciar, con una lista objetiva de SE, se plantean dos SE que complementarían estas funciones. Para estos últimos sistemas sus objetivos se definen por intuición, tratando de ilustrar que la IA aplicada a la operación de SEP y SDE es un campo virgen de investigación.

C A T A L O G O D E S I S T E M A S E X P E R T O S

- (1) Procesamiento de alarmas. Eliminar la sobrecarga informativa, detectar información errónea y presentar, en lugar de mensajes disímiles de eventos, líneas de razonamiento complementadas con ayudas gráficas en la IHM de los centros de operación.
- (2) Restauración del SEP. Ayudar en la restauración del SEP y permitir en un modo de simulación la realización de simu-

lacros de disturbios y recuperación del sistema.

- (3) Restauración del SDE. Localización de zonas dañadas y restauración de áreas sanas en redes de distribución.
- (4) Entrenamiento de operadores. Simulación tutorial inteligente en la enseñanza/entrenamiento de operadores.
- (5) Control de tensión y potencia reactiva. Guiar la operación del sistema y auxiliar al operador en el proceso de toma de decisiones, eliminando los problemas de alerta/emergencia.
- (6) Seguridad del SEF. Auxiliar al operador en la selección de contingencias e interpretación de los resultados de la simulación realizada.
- (7) Predicción de contingencias. Aplicar el reconocimiento de patrones para predecir un estado postdisturbio.
- (8) Detección y diagnóstico de fallas¹⁹. Identificar disturbios del sistema, considerando errores de la información y operaciones incorrectas de elementos.
- (9) Flujos de potencia del operador²⁴. Construcción de modelos de flujos, a partir del conocimiento a priori de los perfiles de inyecciones en los nodos, permitiendo mediante un proceso de estimación (mínimos cuadrados) la solución en banda de varios casos, usando simplemente multiplicación de matrices.
- (10) Simulación cualitativa²⁵. Identificar los posibles eventos que pueden presentarse en el sistema y cuantificar sus consecuencias.
- (11) Corrección de datos²⁵. Identificar/eliminar datos erróneos

y deducir/extrapolar datos incompletos que se obtengan de los instrumentos de medición, o en un enlace de datos.

(12) Análisis post-disturbio. Seleccionar de los datos recibidos de las exploraciones conjuntos selectos de datos relacionados con disturbios correlacionados.

(13) Tiro y restauración de carga. En base en la detección de problemas de baja frecuencia, realizar automáticamente la desconexión/reconexión de cargas.

Sería conveniente determinar la prioridad que tienen los SE del catálogo para la operación del sistema nacional, tomando en cuenta los beneficios esperados y la factibilidad de implantación. Un interesante estudio²², tomando en cuenta estos factores concluye que los SE prioritarios son el 4 y el 8. Sin embargo, no se comparan todos los sistemas del catálogo y las conclusiones no son satisfactorias desde el punto de vista de este trabajo. Por ejemplo, en la tabla 4-4 se califican los criterios para el SE número uno, procesamiento de alarmas.

critérios	ref 25	propuesto
1. Ahorro en el costo de operación	2	1
2. Mejora en la calidad del servicio	2	1
3. Existencia del conocimiento	1	1
4. Factibilidad de implantación	1	1
5. Costo de desarrollo (tiempo)	3	2
6. Generalidad del sistema producido	2	2
7. Portabilidad	2	1
8. Necesidad en el sector eléctrico	2	1

Tabla 4-4. Prioridad de implantación del SE para el procesamiento de alarmas.

Las calificaciones empleadas son en la escala de 1 a 3, en orden decreciente. Las discrepancias en algunas de las calificaciones se deben a:

Ahorro en el costo de operación. Aun cuando es un factor indirecto, el SE reduce los tiempos de recuperación de fallas, disminuyendo las pérdidas por indisponibilidad del suministro de energía.

Mejora en la calidad del servicio. Se mejora al reducir tiempos de estados de alerta/emergencia.

Costo de desarrollo. No se considera apropiado que el costo de este sistema se califique de extrema dificultad. Al comparar las calificaciones de este sistema con el de detección y diagnóstico de fallas, a este último se le califica con 1. Sin embargo, de las referencias 17 y 19 se infiere que los sistemas son de dificultad equivalente.

Portabilidad. Su uso se puede generalizar a cualquier área del SIN.

Necesidad en el sector eléctrico. For los graves problemas que presentan los procesadores de alarmas tradicionales, este SE es definitivamente uno de los urgentes para el sector eléctrico. Incluso, para el CCA central la situación es crítica, ya que la operación de la red (sin la distribución) se efectúa desde una misma sala de control, se usan dos sistemas de cómputo independientes, se duplica la función de adquisición de datos en varias instalaciones, lo que torna a los factores indeseables, discutidos en capítulo 3, verdaderamente dramáticos.

Por las calificaciones presentadas en la tabla y en particular en lo relativo a la necesidad en el sector eléctrico, se concluye que el SE prioritario es el procesador de alarmas.

Al observar detenidamente el análisis realizado se deduce que la mayor parte de los criterios de la tabla 4-4 no pueden calificarse objetivamente y por lo tanto es improcedente la clasificación de esta manera. Esto no invalida la importancia de los criterios en el desarrollo de los sistemas y se deben tomar en cuenta.

4.3 Integración de sistemas expertos en los centros de control

Para aplicar los SE del catálogo para la operación de la red eléctrica nacional, debe realizarse un análisis para encontrar la manera mas conveniente de integrarlos en las estructuras de control existentes y futuras equivalentes. Es aquí donde algunos de los criterios de la tabla 4-4 juegan un papel primordial. Por ejemplo, la portabilidad implica que un sistema desarrollado podrá implantarse en las estructuras de control, con adaptaciones mínimas.

Para diseñar la integración de los SE en los sistemas de control se necesita identificar plenamente sus ambientes de operación y las factibilidades de implantaciones. Tales alcances están fuera del trabajo y sólo se tratará con cierto detalle el sistema prioritario relativo al procesamiento de alarmas. De los otros unicamente se darán algunas ideas al respecto.

4.3.1 Procesamiento de alarmas.

Los objetivos ideales de integración de este sistema son:

- (1) Aplicarlo en los sistemas de control existentes y futuros del sistema eléctrico del país con desarrollos adicionales mínimos.

(2) Utilizar herramientas de desarrollo de IA comerciales.

(3) Emplear algún lenguaje de programación simbólico.

El primer punto implica casi total independencia de los sistemas de cómputo, el segundo la manera práctica de crear/mantener la DC y el tercero el desarrollo de la programación usando LISP, PROLOG o algún otro lenguaje similar. Para que resulte económico y por consiguiente atractivo el desarrollo, es necesario el empleo de herramientas de construcción ("shells") ya que proporcionan un editor para la adquisición del conocimiento y un módulo de asistencia para simplificar la construcción del sistema; sin embargo, su empleo está restringido a poder representar el problema con una forma ya definida según un escenario que impone la herramienta de construcción.

Para satisfacer los objetivos del SE, se propone aplicar un sistema distribuido como se muestra en la figura 4-7.

Al distribuir el sistema experto, como se muestra en la figura 4-7, se tiene la gran ventaja de poder transportarlo a los distintos sistemas de control, existentes o futuros. En efecto, bastará con desarrollar una interfaz de acoplamiento entre los sistemas de cómputo, para garantizar la portabilidad deseada.

El SE requiere toda la BD del sistema de control relacionada con los puntos susceptibles de alarmar; incluyendo definiciones, diagramas e información dinámica. La información estática sólo se necesita cargar una vez o cuando haya modificaciones. La información dinámica se debe actualizar al detectar un cambio y periódicamente para asegurar la integridad de la BD.

El SE estará basado en microcomputadoras. De éstas están ya en el mercado sistemas realmente poderosos: capacidad, rapidez, terminales, etc. Asimismo, los costos de estos sistemas son

bastante económicos. También, se ofrecen para estas máquinas paquetes de desarrollo de IA verdaderamente atractivos³⁰.

Otra ventaja del esquema propuesto es la independencia de desarrollo que se tendrá respecto al uso de los sistemas de cómputo de las estructuras de control en operación.

La desventaja del esquema propuesto es la separación de la IHM en las dos partes. Sin embargo, se considera que ésta no es de gran peso, e incluso, para el área central no existe ya que el sistema concentraría la información de los dos sistemas, eliminando posibles confusiones al operador, por incongruencia de la información.

La idea de distribuir la inteligencia hasta el nivel de las terminales remotas no deja de ser interesante. Sin embargo, su implantación es inconveniente porque existen en el país un gran número de equipos instalados y los costos de adaptación serían sumamente altos.

4.3.2 Otros sistemas expertos

En esta sección se trata lo relativo a la integración en los sistemas de control de algunos otros SE del catálogo. Es necesario aclarar que para determinar la mejor alternativa de integración se debe realizar un estudio detallado del ambiente de operación de cada sistema. Por otra parte, ciertos SE, aun cuando son muy interesantes, tienen factores que no favorecen su integración en los sistemas de control.

Restauración del SEP. Sistema muy necesario. Su integración se propone mediante una estructura similar a la mostrada en la figura 4-7. Aplicación en CNC y CCA.

Restauración del SDE. Este sistema reduciría de manera impor-

tante los tiempos de interrupción de servicios a usuarios. Su uso es sumamente atractivo para zonas urbanas de gran población. Requiere acondicionamientos costosos de la red (seccionadores, restauradores, etc. y facilidades de comunicaciones).

Entrenamiento de operadores. Su integración en los sistemas de control es improbable. El SE debe controlar un conjunto existente de programas de aplicación y las adaptaciones son imprácticas. Los sistemas del futuro muy posiblemente dispondrán de un sistema integrado de este tipo.

Predicción de contingencias. Sistema con posibilidad de aplicación práctica muy pobre. Se necesita invertir mucho tiempo en la creación de la base de datos de estudio, la cual es sumamente costosa en requerimientos de almacenamiento. Su integración no es factible en los sistemas en operación.

Flujos de potencia del operador. Igual que el caso anterior.

Detección y diagnóstico de fallas. El sistema engloba al SE análisis post-disturbio. Este es un sistema muy complejo, ya que los tiempos de respuesta son críticos¹⁹. En la misma referencia, se sugiere su integración, acoplando varias micro-computadoras con los sistemas de control.

En lugar de ese complicado sistema se recomienda complementar la función de análisis post-disturbio en los sistemas EMS de los CCA. La función del SE sería auxiliar en la interpretación de los disturbios, para lo cual utilizaría los datos "crudos" de los archivos creados por la incompleta función dispuesta.

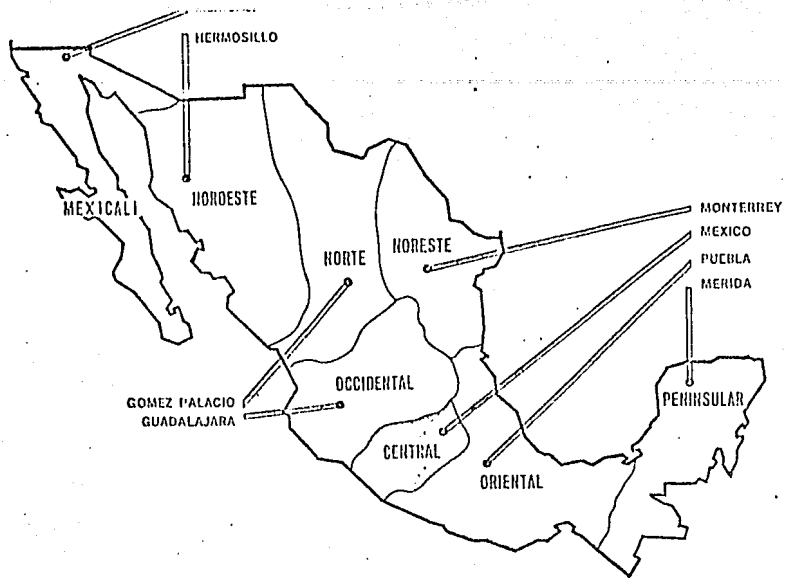


FIG. 4.1 AREAS DE CONTROL DEL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

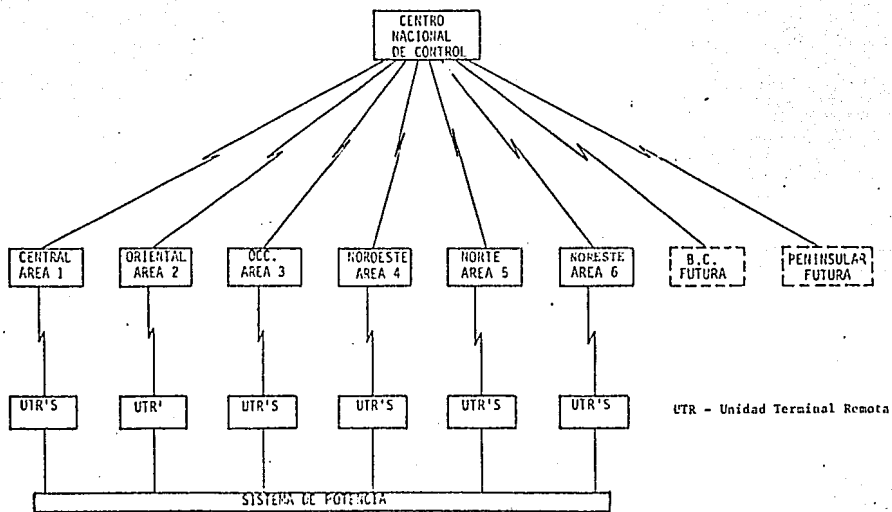
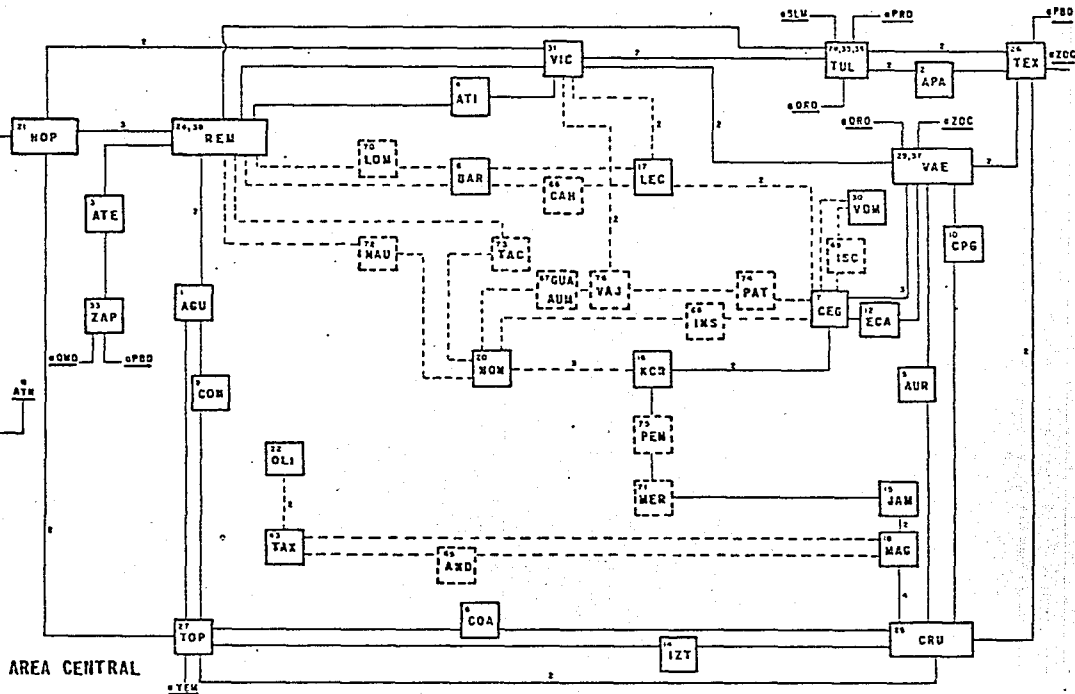


FIG. 4.2 CONFIGURACION DEL SISTEMA DE INFORMACION Y CONTROL EN TIEMPO REAL



INSTALACIONES CON UTR:

1 AGUILAS, 2 APASCO, 3 ATENCO, 4 ATIZAPAN, 5 AURORA, 6 BARRIENTOS, 7 CERRO CORDO, 8 COAPA, 9 CONTRERAS, 10 CHAPINCO, 11 DONATO GUERRA, 12 ECATEPEC, 13, 14 IZTAPALAPA, 15 JAMAICA, 16 K-CERO, 17 LECHERIA, 18 MACDALENA, 20 NONGALCO, 21 NOPALA, 22 OLIVAR / - ALAMO, 23 PITIRERA, 24 REMEDIOS I (230 kV), 25 SANTA CRUZ, 26 TEXCOCO, 27 TOPILEJO, 28 TULA I (SE'), 29 VALLE DE MEXICO I (230 kV), 30 VALLE DE MEXICO II (85 kV), 31 VICTORIA, 32 VILLITA, 33 ZAPATA, 34 INFIERNILLO, 35 TULA II (PTA), 36 TULA CC, 37 VALLE DE MEXICO PLANTA, 38 REMEDIOS II (85 kV), 43 TAXQUESA TAX/TCX.

INSTALACIONES SIN UTR (PUNTEADAS):

65 SAN ANDRES, 66 CEMENTOS ANAHUAC, 67 GUADALUPE/AUTOMETALES, 68 INSURGENTES, 69 INDUSTRIAL SAN CRISTOBAL, 70 LOMA, 71 MERCED, 72 NAUCALPAN, 73 TACUBA, 74 PATERA, 75 PENSADOR, 76 VALLEJO

FIG. 4.3 RED AREA ELECTRICA CENTRAL

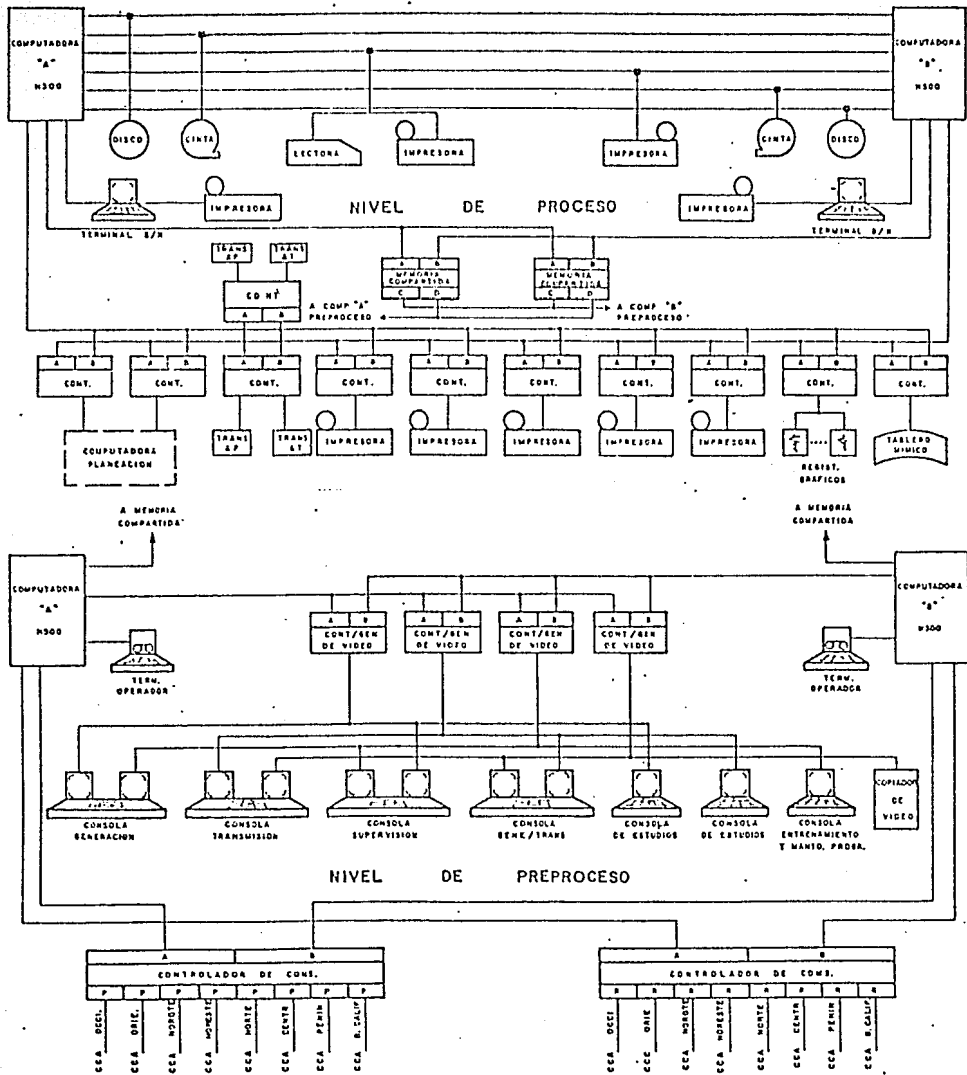


FIG. 4.4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL COORDINATOR

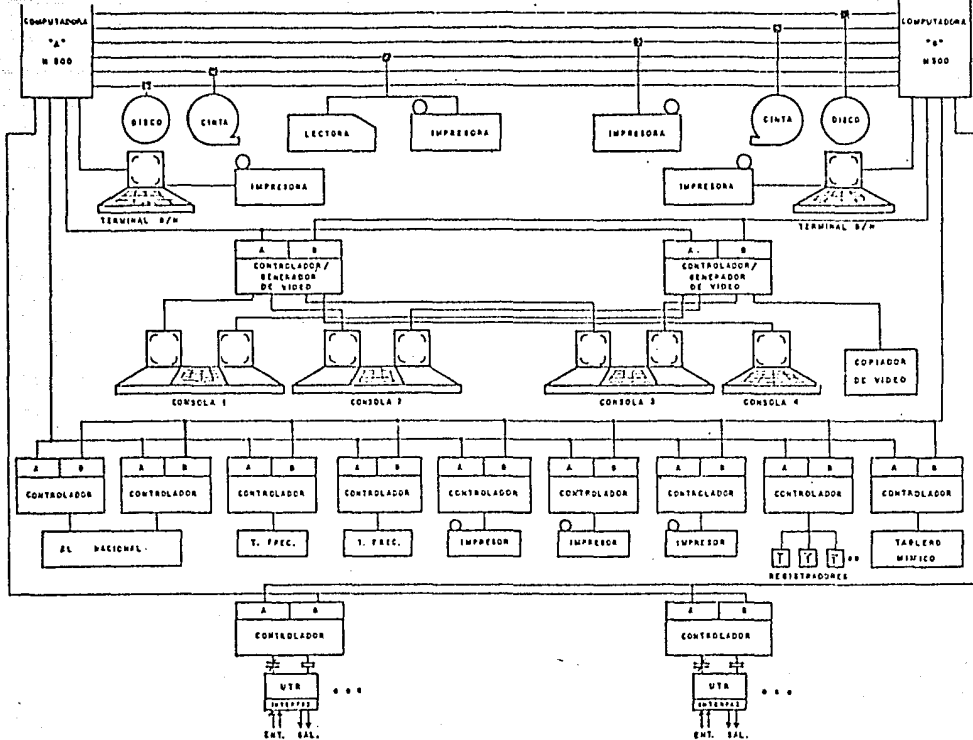


FIG. 4.5 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL DEL AREA CENTRAL (CMS)

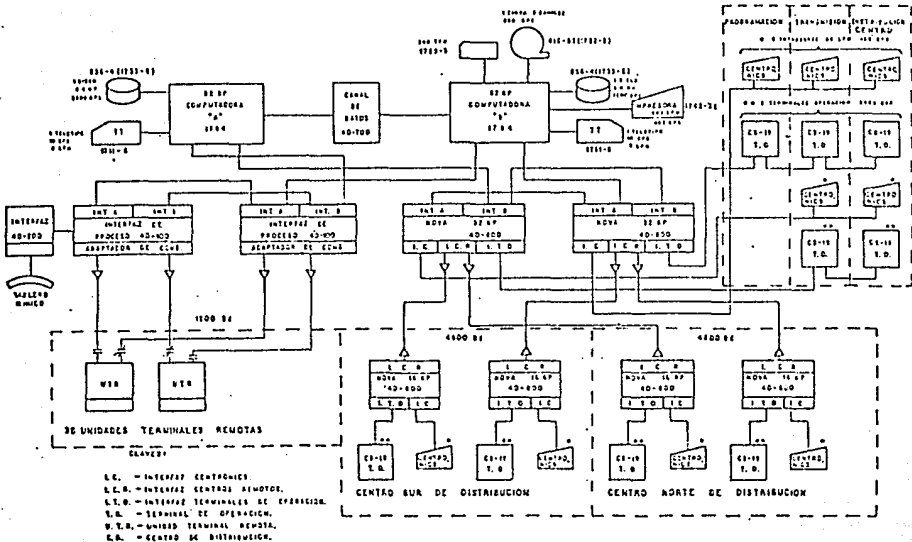


FIG. 4.6 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL DEL AREA CENTRAL (SCANA)

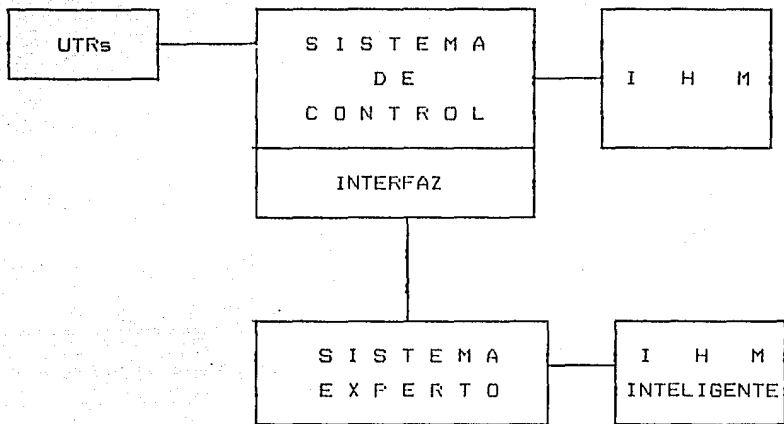


Figura 4-7 Integración del sistema experto de alarmas en las estructuras de control.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La operación de los sistemas eléctricos se soporta en centros de control, buscando cumplir las premisas fundamentales de seguridad y economía. Estos centros se han enriquecido con funciones sofisticadas requiriendo del manejo de grandes volúmenes de información en un ambiente de tiempo real. En particular, la operación del sistema eléctrico interconectado nacional se opera con un centro nacional que coordina a otros seis centros de control de área, consolidando un sistema jerárquico de tres niveles.

No obstante el estado del arte de los sistemas de control, en varias situaciones la información presentada a los operadores del sistema eléctrico no es congruente con su lógica de toma de decisiones ocasionando serios problemas, en especial en los estados de emergencia/restaurativo. Este es el caso del procesamiento de alarmas/eventos de la función SCADA. En efecto, se presentan una serie de factores indeseables dentro de los que figura en primer término la sobrecarga informativa. Al reflexionar sobre las graves consecuencias operativas de estos factores indeseables y ponderando los criterios de diseño determinantes, comparativamente con otros sistemas, se concluye que el manejo de alarmas/eventos es el problema prioritario de los sistemas de control del sector eléctrico.

La aplicación de un sistema experto de la inteligencia artificial, resuelve definitivamente el grave problema planteado. Su implantación en los sistemas de control es posible al existir el conocimiento. Este hecho implica que con una herramienta de construcción adecuada podría crearse la base de conocimientos y con los módulos de asistencia de desarrollo se simplificaría la obtención del sistema. Se recomienda integrar el sistema en base a la técnica de cómputo distribuido, lo cual es favorable al poder transportar el experto a los diversos centros de con-

trol. El desarrollo se haría utilizando una microcomputadora de tecnología avanzada, que en una primera fase sería un prototipo para acoplarlo a un sistema particular. Para llevar a cabo este plan se deben realizar diversas tareas, entre otras:

- (1) Complementar las reglas del experto (entrevistas a operadores y otros especialistas).
- (2) Investigar sobre las herramientas de desarrollo.
- (3) Adquisición del equipo y los paquetes de desarrollo.
- (4) Especificaciones de diseño del sistema.
- (5) Diseño de interfaz de acoplamiento.

Dentro de las ventajas del esquema propuesto se pueden mencionar:

- Portabilidad. Para integrar el sistema experto en un sistema de control diferente es necesaria una interfaz de acoplamiento.
- Independencia de desarrollo. Los trabajos de implantación casi no se afectan por indisponibilidad de máquina, problema que se presenta en sistemas en operación continua.

De encontrar en el mercado la herramienta de desarrollo apropiada se tendrían otras ventajas adicionales muy importantes, como son: menor tiempo de desarrollo, disminución de costos, y obtención de un sistema poderoso.

Otro sistema prioritario para el sector eléctrico es un SE para la restauración del SEP. La implantación de este sistema se podría lograr mediante una estructura similar a la del SE an-

terior. Sin embargo, es necesario realizar una investigación exhaustiva al respecto.

La restauración del SDE es definitivamente necesario para redes densas como la del área central. Sin embargo, el costo del sistema puede ser demasiado alto. Esto se debe a que es necesario realizar estudios y acondicionamientos de la red con dispositivos de control/seccionalización, así como disponer de los medios de comunicaciones para enlazar a los elementos con el centro de control.

La función primaria de entrenamiento de operadores no parece posible de integrar en las estructuras de control existentes, por lo impráctico que resultaría tratar de adaptar la programación de aplicación, para trabajar en un ambiente de simulación. Los sistemas de control del futuro seguramente contarán con estas facilidades de entrenamiento.

Otros sistemas de IA importantes se relacionan con el control de tensión y potencia reactiva. De éstos los candidatos de desarrollo son:

- (1) La operación guiada basada en el conocimiento y
- (2) asistencia en la toma de decisiones.

De los dos se recomienda en primer lugar al primero; sin embargo, aun cuando se dieron los principios básicos se requiere el estudio de los ambientes de operación para determinar la posibilidad de integración en los sistemas de tiempo real.

También, un sistema experto para la selección de contingencias y la interpretación de resultados sería útil en el CNC. Asimismo, la predicción de contingencias es una aplicación sumamente interesante pero las posibilidades de éxito en tiempo real no se ven favorables.

Existen desde luego una gran cantidad de expertos cuya investigación es motivante. Algunos de éstos se encuentran contenidos en el catálogo de sistemas expertos, iniciado en este trabajo.

Se espera en poco tiempo ver a los centros de control equipados con importantes sistemas de IA, los que contribuirán, sin duda, a satisfacer los objetivos de mejorar la seguridad de la operación de los sistemas eléctricos, incrementando la calidad y la economía y lo que es fundamental, proporcionando resultados congruentes con la lógica de toma de decisiones del operador.

Al margen de la inteligencia artificial aplicada, no puede dejar de ponderarse la importancia de la inteligencia artificial pura en el ámbito de la investigación. Esta tiene como objetivo primordial la imitación de los procesos mentales, creando máquinas inteligentes. Al hacer una reflexión filosófica en este aspecto se puede sugerir que esta enigmática perspectiva representa un peligro para el hombre del futuro, ya que podría generarse una contaminación intelectual, al desafiarse los designios naturales que aparentemente reservan la exclusividad de la inteligencia superior para el hombre.

6. APENDICE

6.1 Nomenclatura.

Análisis de seguridad	-----	AS
Análisis de seguridad en tiempo real	-----	RTSA
Base de conocimientos	-----	BC
Base de datos	-----	BD
Baud	-----	Ed
Cálculo automático de intercambios	-----	PCAI
Centro nacional de control	-----	CNC
Comisión Federal de Electricidad	-----	CFE
Compañía de Luz y Fuerza del Centro	-----	CLFC
Configurador de la red	-----	CR
Control automático de generación	-----	CAG
Centros de control de área	-----	CCA
Control remoto y adquisición de datos	-----	SCADA
Despacho económico de carga	-----	DEC
Despacho económico restringido	-----	DER
Ejecutivo de programas de análisis	-----	NAPS
Entero	-----	INT
Estimador de estados	-----	ES
Estudios y análisis de la red	-----	STNA
Flujos de carga del operador	-----	FCO
Inteligencia artificial	-----	IA
Interfaz hombre máquina	-----	IHM
Instituto de Investigaciones Eléctricas	-----	IIE
Megawatt	-----	MW
Mínimos cuadrados pesados	-----	WLS
Procesamiento de datos	-----	PD

Procesamiento natural del lenguaje	-----	PNL
Punto flotante	-----	FP
Reducción de la red	-----	RR
Redes de conocimientos	-----	RC
Reglas de producción	-----	RP
Sistema de administración de energía	-----	EMS
Sistemas del conocimiento	-----	SC
Sistema de distribución de energía	-----	SDE
Sistema eléctrico de potencia	-----	SEP
Sistema eléctrico interconectado nacional	-----	SIN
Sistema experto	-----	SE
Terminal de operación de video	-----	TRC
Terminales inteligentes	-----	TI

7. REFERENCIAS

- [1] J. José Flores Romero. "Introducción al lenguaje PROLOG y algunas aplicaciones". Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Informe técnico No. 27, nov. 1985.
- [2] Elaine Rich. "Artificial Intelligence", McGraw-Hill Book Co, 1983. (Libro)
- [3] A. Guzmán Arenas. "Tutorial sobre sistemas de cómputo de la quinta generación". Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Informe técnico No. 28, nov. 1985.
- [4] Edward A. Feigenbaum & Julian Feldman. "Computers and Thought" McGraw-Hill Book Co. 1963. (Libro)
- [5] S.V. Chapa Vergara. "Arquitectura de sistemas expertos". Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Informe técnico No. 14, agosto 1984.
- [6] Paul L. Mayer. "Probabilidad y aplicaciones estadísticas". Addison-Wesley, 1970. (Libro).
- [7] J. Juan Flores Romerò. "Incertidumbre de Sistemas Expertos". Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Informe técnico No. 33, noviembre 1985.
- [8] H. Saldaña Aldana. "Sistemas Expertos en Ingeniería". Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Informe técnico No. 30A, 2ª edición noviembre 1985.
- [9] David G. Luenberger. "Introduction to Linear and Nonlinear Programming". Addison-Wesley, 1973. (Libro)

- [10] P.Vandeginste. "Las aplicaciones de los sistemas expertos". Mundo científico, No. 65, mayo 1987.
- [11] Richard E. Morley & William A. Taylor. "What is Artificial Intelligence?" Artificial Intelligence Series, Digital Design, abril 1986.
- [12] Roger Langley. "Artificial Intelligence Activities at Control Data". VIM Session DBBP-22.
- [13] Frederick Hayes-Roth, Teknowledge, Inc. "Knowledge Based Expert Systems". Octubre 1984.
- [14] Frederick Hayes-Roth, Teknowledge, Inc. "The Knowledge-Based Expert System, A tutorial". Septiembre 1984.
- [15] P.A. Sachs, A.M. Paterson, M.H. Turner. "Escort-an Expert System for Complex Operations in real time". PA Computers Telecommunications Rochester House, England. Experts Systems, enero 1986, vol 3. No. 1".
- [16] J.S. Horton, Bill Prince, A. M. Sasson y otros. "Advances in Energy Management Systems", IEEE Trans. Vol PWRS-1 No. 3, agosto de 1986.
- [17] Wolleberg, B.F. "Feasibility Study for an Energy Management System Intelligent Alarm Processor". 1985, IEEE Power Industry Computer Applications Conference, pag.249-254.
- [18] Chen-Ching Liu, Seung Jae Lee, S.S. Venkata. "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution System". PICA mayo 1987 Montreal Can.
- [19] E.Cardozo, Sarosh N.Talukdar. "A Distributed Expert System for Fault Diagnosis". PICA mayo 1987, Montreal, Can.

- [20] Yoh-Han Pao and T.E. Dy Liacco. "Artificial Intelligence and the Control of Electric Power System". 9th International Word Congress, Budapest 1984.
- [21] A. Doi, K. Uemura. "Knowledge-Based Operation Guidance Method for Voltage and Reactive Power Control in Power Systems. IFAC Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, Brazil, 1985".
- [22] Chen-Ching Liu, Kevin Tomsovic. "An expert System Assisting Decision-Making of Reactive Power/Voltage -- Control". IEEE 1985.
- [23] E.C. Mc Clelland, P.R. Van Horne "Fast Voltage Prediction Using a Knowledge Based Approach". IEEE Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102 No. 2, febrero 1983.
- [24] Richard D. Christie and Sarash N. Talukdar. "Expert Systems for on Line Security Assessment. A preliminary Design". PICA, mayo 1987, Montreal Can.
- [25] E.F. Morales, R. Bañares A. y A. Villavicencio R. "Sistemas expertos en tiempo real y sus aplicaciones al sector eléctrico". Boletín IIE, enero/febrero 1987, vol.11, num 1 página 13.
- [26] A. Keyhani and A. Abur. "Knowledge-Based Power Flow Models" Electric Power System Research. 1985 Pag. 183-191.
- [27] R. Avila, J. Martínez y M. Mier. "El despacho económico en modo de estudio: una herramienta para planear la operación de sistemas eléctricos de potencia". Boletín IIE marzo/abril 1987, vol 11, num 2, página 55.
- [28] M. Angel Avila Rosales. "Funciones de Seguridad para la

Operación del Sistema Eléctrico". Curso Técnicas Modernas de Control en la Operación, junio 1983, Puebla, Pue.

[29] B. Stott, O. Aisac. "Fast Decoupled Load Flow". IEEE, Trans. Vol PAS-92 mayo/junio 1974.

[30] William B. Gervater. "The Nature and Evaluation of Commercial Expert System Building Tools". Computer, mayo 1987.