



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

FACULTAD DE INFORMÁTICA

DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN

**INTEGRACIÓN DE DATOS, INFORMACIÓN Y
CONOCIMIENTO, EN UNA ARQUITECTURA
PARA LA MONITORIZACIÓN INTELIGENTE
DEL PACIENTE CRÍTICO**

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

AUTOR: MARIANO JAVIER CABRERO CANOSA
DIRECTOR: VICENTE MORET BONILLO

A CORUÑA OCTUBRE DE 1998

D. Vicente Moret Bonillo, Profesor Titular del Departamento de Computación de la Facultad de Informática de la Universidad de A Coruña.

CERTIFICA QUE: La memoria titulada “Integración de datos, información y conocimiento, en una arquitectura para la monitorización inteligente del paciente crítico”, ha sido realizada por D. Mariano Javier Cabrero Canosa bajo mi dirección en el Departamento de Computación de la Universidad de A Coruña y constituye la Tesis que presenta para optar al Grado de DOCTOR en Informática.

En A Coruña, a 24 de Julio de 1998

Fdo: Vicente Moret Bonillo

Director de la Tesis

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer la colaboración de todos aquellos que han tenido algo que ver en la realización del presente trabajo.

Esta investigación ha sido posible gracias al apoyo financiero facilitado por la Xunta de Galicia en su proyecto XUGA-10201B90, y por la CICyT en los proyectos TIC-910789 y TIC-960590.

A Coruña, Julio de 1998

A Belén y a mi familia

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ¿QUÉ ES LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL?	2
1.2 BREVE HISTORIA DE LA IA	3
1.2.1 <i>La génesis de la inteligencia artificial (1943-1956).</i>	4
1.2.2 <i>Entusiasmo y grandes expectativas (1952-1969)</i>	4
1.2.3 <i>Una dosis de realidad (1966-1974)</i>	5
1.2.4 <i>Sistemas basados en conocimiento, ¿la clave del poder? (1969-1979)</i>	6
1.2.5 <i>La Inteligencia Artificial se convierte en una industria (1980-1988)</i>	8
1.2.6 <i>El retorno de las Redes de Neuronas (1986-presente)</i>	8
1.2.7 <i>Sucesos recientes (1987-presente)</i>	8
1.3 CONCEPTOS DE IA.....	9
1.3.1 <i>Datos, información y conocimiento</i>	9
1.3.2 <i>Representación del conocimiento</i>	12
1.3.3 <i>Espacio de estados y Búsqueda</i>	13
1.4 SISTEMAS EXPERTOS.....	14
1.4.1 <i>Historia de los SSEE</i>	16
1.4.2 <i>Componentes de un Sistema Experto</i>	18
1.4.3 <i>Sistemas expertos basados en reglas</i>	20
1.4.4 <i>Clasificación de los SSEE</i>	22
1.4.5 <i>Etapas en la construcción de un Sistema Experto</i>	24
1.5 INFORMÁTICA MÉDICA.....	25
1.5.1 <i>Definiciones</i>	26
1.5.2 <i>Sistemas de Ayuda a la Decisión Médica</i>	27
1.5.3 <i>Inteligencia Artificial en Medicina</i>	27
1.6 MONITORIZACIÓN INTELIGENTE EN MEDICINA	29
1.6.1 <i>Monitorización: Una definición</i>	30
1.6.2 <i>Entorno de trabajo</i>	30
1.6.3 <i>Monitorización Inteligente</i>	31
1.6.4 <i>Tareas de la monitorización</i>	33
1.6.5 <i>Niveles de tratamiento de datos</i>	34
1.6.6 <i>Arquitectura básica de un sistema de monitorización inteligente</i>	36
1.6.7 <i>Clasificación de SMI</i>	38
1.6.8 <i>Problemas de desarrollo de SMI</i>	39
1.7 RESUMEN.....	40
1.8 PROPÓSITO Y ALCANCE DE LA PRESENTE TESIS.....	40
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA CLÍNICO.....	43
2.1 EL PROCESO DE DIAGNÓSTICO EN MEDICINA.....	43
2.1.1 <i>Introducción</i>	43

2.1.2	<i>La toma de decisión médica</i>	45
2.2	LAS UNIDADES DE CUIDADOS INTENSIVOS.....	49
2.2.1	<i>Generalidades</i>	49
2.2.2	<i>Supervisión de pacientes: Fases</i>	51
2.3	INFORMATIZACIÓN EN LAS UNIDADES DE CUIDADOS INTENSIVOS.....	53
2.3.1	<i>Objetivos: soporte monitorización</i>	54
2.3.2	<i>Monitorización convencional vs inteligente</i>	55
2.3.3	<i>Configuración ideal</i>	58
2.3.4	<i>Panorama actual</i>	59
2.3.5	<i>Análisis crítico</i>	60
2.4	RESUMEN.....	66
3.	ANTECEDENTES Y REALIZACIONES PREVIAS	69
3.1	INTRODUCCIÓN	69
3.2	VM.....	70
3.2.1	<i>Objetivos o metas del sistema</i>	70
3.2.2	<i>Ciclo de ejecución del sistema</i>	71
3.2.3	<i>Arquitectura del sistema</i>	71
3.2.4	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	72
3.2.5	<i>Comentario crítico</i>	74
3.3	PUFF.....	76
3.3.1	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	76
3.3.2	<i>Arquitectura del sistema</i>	77
3.3.3	<i>Ciclo de ejecución del sistema</i>	77
3.3.4	<i>Comentario crítico</i>	78
3.4	ESTER	79
3.4.1	<i>Objetivos o metas del sistema</i>	79
3.4.2	<i>Ciclo de ejecución del sistema</i>	79
3.4.3	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	80
3.4.4	<i>Arquitectura del sistema</i>	81
3.4.5	<i>Comentario crítico</i>	82
3.5	KUSIVAR	83
3.5.1	<i>Metas del sistema</i>	83
3.5.2	<i>Arquitectura del sistema</i>	84
3.5.3	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	84
3.5.4	<i>Ciclo de ejecución del sistema</i>	87
3.5.5	<i>Comentario crítico</i>	87
3.6	WEANPRO	88
3.6.1	<i>Metas del sistema</i>	88
3.6.2	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	89
3.6.3	<i>Arquitectura del sistema</i>	89

3.6.4	<i>Ciclo de ejecución del sistema</i>	90
3.6.5	<i>Comentario crítico</i>	91
3.7	GUARDIAN	92
3.7.1	<i>Metas del sistema</i>	92
3.7.2	<i>Arquitectura del sistema</i>	93
3.7.3	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	95
3.7.4	<i>Ciclo de razonamiento del sistema</i>	96
3.7.5	<i>Comentario crítico</i>	96
3.8	SIMON	96
3.8.1	<i>Metas del sistema</i>	97
3.8.2	<i>Arquitectura del sistema</i>	97
3.8.3	<i>Ciclo de ejecución del sistema</i>	99
3.8.4	<i>Comentario crítico</i>	100
3.9	VIE-VENT	101
3.9.1	<i>Metas del sistema</i>	101
3.9.2	<i>Arquitectura del sistema</i>	101
3.9.3	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	103
3.9.4	<i>Ciclo de ejecución del sistema</i>	103
3.9.5	<i>Comentario crítico</i>	104
3.10	NÈOGANESH	105
3.10.1	<i>Objetivos o metas del sistema</i>	105
3.10.2	<i>Arquitectura del sistema</i>	106
3.10.3	<i>Descripción y representación del conocimiento</i>	108
3.10.4	<i>Comentario crítico</i>	109
3.11	RESUMEN	109
4.	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	112
4.1	INTRODUCCIÓN	112
4.2	OBJETIVOS DEL SISTEMA	113
4.3	ESTABLECIMIENTO DE REQUISITOS	114
4.3.1	<i>Entorno de aplicación</i>	114
4.3.2	<i>Necesidad del sistema</i>	116
4.3.3	<i>Descripción funcional</i>	117
4.3.4	<i>Requisitos No Funcionales</i>	118
4.4	DISEÑO DEL SISTEMA	119
4.4.1	<i>Perspectiva general</i>	120
4.4.2	<i>Estructura Modular Propuesta</i>	121
4.4.3	<i>Interrelación modular</i>	122
4.4.4	<i>Descripción de los subsistemas</i>	123
4.5	RESUMEN	143
5.	REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO	147

5.1	INTRODUCCIÓN	147
5.2	NEXPERT OBJECT: LA HERRAMIENTA DE DESARROLLO	151
5.2.1	<i>Introducción</i>	151
5.2.2	<i>Estructuras de representación básicas</i>	151
5.2.3	<i>Razonamiento y Conocimiento de Control</i>	154
5.3	CONOCIMIENTO DEL DOMINIO	158
5.3.1	<i>Introducción</i>	158
5.3.2	<i>Clases y Objetos del dominio</i>	161
5.3.3	<i>Bases de reglas</i>	165
5.4	RESUMEN	176
6.	ARQUITECTURA E IMPLEMENTACIÓN.....	179
6.1	INTRODUCCIÓN	179
6.2	LA ARQUITECTURA CLIENTE-SERVIDOR	180
6.2.1	<i>Conceptos preliminares</i>	182
6.2.2	<i>Aplicación al dominio del problema</i>	184
6.3	ESTACIÓN LOCAL.....	190
6.3.1	<i>Introducción</i>	190
6.3.2	<i>Adquisición de datos</i>	192
6.3.3	<i>Preprocesado Simbólico</i>	195
6.3.4	<i>Módulo de Control</i>	196
6.3.5	<i>Comunicaciones</i>	197
6.3.6	<i>Interfaz gráfica</i>	198
6.4	ESTACIÓN CENTRAL.....	201
6.4.1	<i>Introducción</i>	201
6.4.2	<i>Flujo de datos</i>	203
6.4.3	<i>Módulo de Control</i>	204
6.4.4	<i>Módulo de Comunicaciones</i>	205
6.4.5	<i>Módulo inteligente</i>	209
6.4.6	<i>Interfaz Gráfico</i>	210
6.5	RESUMEN	214
7.	RESULTADOS	217
7.1	VALIDACIONES PREVIAS DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DE PATRICIA	217
7.2	METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO DE CAMPO.....	218
7.3	RESULTADOS PARA LA CATEGORÍA DIAGNÓSTICA DE RESPIRACIÓN ENDÓGENA.....	221
7.4	RESULTADOS PARA LA CATEGORÍA DIAGNÓSTICA DE HEMODINÁMICA.....	224
7.5	RESULTADOS PARA LA CATEGORÍA DIAGNÓSTICA DE FRECUENCIA CARDÍACA.....	227
7.6	RESULTADOS PARA LA CATEGORÍA DIAGNÓSTICA DE OXIGENACIÓN	231
7.7	RESULTADOS PARA LA CATEGORÍA DIAGNÓSTICA DE OXIGENACIÓN	234
7.8	RESULTADOS PARA LA CATEGORÍA DIAGNÓSTICA DE BALANCE ÁCIDO-BASE	237
7.9	RESULTADOS PARA LA CATEGORÍA DIAGNÓSTICA DE VENTILACIÓN	240

7.10	RESUMEN.....	242
8.	DISCUSIÓN.....	245
8.1	RESULTADOS DE VALIDACIÓN	245
8.2	DISCUSIÓN DEL SISTEMA	247
9.	CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES.....	253
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	259

1. INTRODUCCIÓN

*La suma de la inteligencia en el planeta es
constante; sin embargo la población crece.
(Axioma de Cole)*

*Lo siento Dave, no te permito hacer eso.
(HAL 9000 en 2001: A Space Odyssey de Arthur
C. Clark)*

El hombre se ha aplicado a sí mismo el nombre científico de *homo sapiens* como una valoración de la trascendencia que tienen nuestras habilidades mentales tanto para nuestra vida cotidiana como para nuestro propio sentido de identidad. El campo de la **Inteligencia Artificial**, o IA, se enfoca en lograr la comprensión de las entidades inteligentes. De este modo, una de las razones de su estudio es aprender más sobre nosotros mismos. Pero a diferencia de la psicología y la filosofía, a las cuales también les concierne la inteligencia, los esfuerzos de la IA están encaminados tanto en la *construcción* de entidades inteligentes como en su *comprensión*. Si bien nadie puede pronosticar con todo detalle lo que en el futuro nos aguarda, es evidente que los ordenadores que posean capacidades inteligentes de nivel humano (¿o superiores?) podrán tener un impacto considerable en nuestra vida diaria así como en el devenir de la civilización [1].

Los problemas que aborda la IA son complejos. ¿De qué forma es posible que un diminuto y lento cerebro, sea biológico o electrónico, tenga capacidad para percibir, comprender, predecir y manipular un mundo que lo supera en tamaño y complejidad? ¿Cómo es posible crear apoyándose tan sólo en estas propiedades? Son preguntas difíciles, pero a diferencia de la investigación en torno a la inalcanzable velocidad de la luz o de algún dispositivo antigravedad, el investigador en IA mantiene la sólida creencia de que la búsqueda es totalmente factible. Todo lo que tiene que hacer es mirarse en el espejo para tener ante sí un ejemplo de sistema inteligente.

La IA es una disciplina moderna que se inicia formalmente en 1956, cuando se acuñó el nombre, aunque previamente ya existían desarrollos en la materia. Se conoce entre los científicos de otras disciplinas como "el campo en el cual me gustaría estar", junto con la moderna genética. Por ello estaría justificada la opinión de un estudiante en Física que considere que todas las buenas ideas se acabaron con el nacimiento de personajes de la talla de Galileo, Newton y Einstein, por lo que pasará seguramente

muchos años estudiando antes de que pueda contribuir mínimamente con nuevas ideas. La IA, sin embargo, todavía tiene cabida para un Einstein “a tiempo completo”.

En la actualidad, la IA abarca una gran variedad de subcampos, desde áreas de propósito general, como es el caso de la percepción o el razonamiento lógico, hasta áreas específicas como el ajedrez, la demostración de teoremas matemáticos y el diagnóstico de enfermedades. No es raro que científicos de otras áreas hagan incursiones graduales en la inteligencia artificial, donde encuentran las herramientas y el vocabulario para sistematizar y automatizar las tareas intelectuales que les han ocupado buena parte de sus vidas. Análogamente, aquellos investigadores que trabajan en inteligencia artificial se les ofrece la opción de aplicar su metodología en casi cualquier área que contemple tareas relacionadas con el intelecto humano. En este sentido, la IA es un campo genuinamente universal.

1.1 ¿Qué es la Inteligencia Artificial?

Una definición completa de la IA estaría afectada del hecho de que la inteligencia en si misma no esta ni bien entendida ni comprendida. Aunque la mayoría de nosotros reconocemos un comportamiento inteligente cuando lo vemos, sin duda nadie es capaz de definir certeramente la inteligencia de una forma lo suficientemente específica para poder ser capaces de evaluar un software supuestamente inteligente mientras que no hayamos captado totalmente la vitalidad y complejidad de la mente humana. Así pues el problema de definir la IA se resume a un problema de definir la inteligencia en si misma [2]. Ya desde su fundación, la IA estaría íntimamente relacionada con la premisa de que toda actividad cognoscitiva puede explicarse en términos de computación [3], y por ello es parte de la ciencia de computación, de la psicología y de la ciencia cognoscitiva [4][5]. Por ello puede considerarse como una ciencia empírica, en la cual los investigadores usan los paradigmas clásicos de hipótesis y prueba para validar los modelos y mecanismos inteligentes de acción que han diseñado. El ordenador es el laboratorio donde tienen lugar los experimentos de IA y el clásico ciclo ingenieril de diseño, construcción, prueba y validación de software es el proceso mediante el cual los investigadores en IA verifican sus hipótesis [3].

Las definiciones de la IA en la literatura especializada se han ocupado en la expansión de los límites de la ciencias de computación mas que en la definición clara de

sus bordes. En la Tabla 1-1 se presentan las aportaciones más importantes. Estas definiciones se mueven en torno a dos dimensiones principales. Las de la parte superior conciernen a *procesos mentales* y de *razonamiento*, en tanto que las de la parte inferior aluden al *comportamiento*. Por otra parte, las definiciones de la izquierda miden el éxito en términos de "performance"¹ humana, mientras que las de la derecha lo hacen de conformidad con un concepto de inteligencia *ideal*, que se puede llamar **racionalidad**, que considera un sistema como racional si hace lo correcto.

<i>Sistemas que piensan como los humanos</i>	<i>Sistemas que piensan racionalmente</i>
<p>"El nuevo y excitante esfuerzo en construir computadoras que piensen...máquinas con mente, en el sentido más amplio" (Haugeland, 1985)</p> <p>"[La automatización de] actividades que asociamos con el pensamiento humano, tales como toma de decisiones, resolución de problemas, aprendizaje" (Bellman, 1978)</p>	<p>"El estudio de facultades mentales a través del uso de modelos computacionales" (Charniak y McDermott, 1985)</p> <p>"El estudio de las computaciones que permiten percibir, razonar y actuar" (Winston, 1992)</p>
<i>Sistemas que actúan como humanos</i>	<i>Sistemas que actúan racionalmente</i>
<p>"El arte de crear máquinas con capacidad de realizar funciones que requieren inteligencia cuando son ejecutadas por personas" (Kurzweil, 1990)</p> <p>"El estudio de cómo hacer que los computadores realicen tareas que, hasta el momento, los humanos hacen mejor" (Rich y Knight, 1991)</p>	<p>"Un campo de estudio que busca explicar y emular la operación inteligente en términos de procesos computacionales" (Schalkoff, 1990)</p> <p>"La rama de las ciencias de computación que trata de la automatización de la conducta inteligente" (Luger y Stubblefield, 1993)</p>

Tabla 1-1: Algunas definiciones de IA organizadas en cuatro categorías

A lo largo de la historia se han adoptado los cuatro enfoques anteriormente mencionados. Como parece lógico ha habido tensiones entre las aproximaciones centradas en aspectos humanos, y las centradas alrededor de la racionalidad, ya que mientras las primeras constituyen una ciencia empírica, que entraña el empleo de hipótesis y de su confirmación experimental, las segundas combinan matemáticas e ingeniería. A pesar de ello, todas las orientaciones se han traducido en valiosas aportaciones.

1.2 Breve historia de la IA

La IA es una disciplina joven aunque hereda muchas ideas, puntos de vista y técnicas de otras disciplinas mucho más antiguas, como pueden ser la filosofía,

¹ *Rendimiento*, aunque en el contexto informático se prefiere el término anglosajón.

matemática, psicología, lingüística y ciencias de la computación, de la que se toman las herramientas de trabajo para que la IA sea una realidad.

1.2.1 La génesis de la inteligencia artificial (1943-1956).

El primer trabajo reconocido en IA fue realizado en 1943 por Warren McCulloch y Walter Pitts y consistió en un modelo de neuronas artificiales, del cual insinuaron la posibilidad de que pudiera ser capaz de aprender si estuviera adecuadamente definido para tal propósito. Donald Hebb (1949) fue quien posteriormente propuso y demostró una regla simple de aprendizaje para estos modelos. Más tarde, Claude Shannon (1950) y Alan Turing (1953) escribieron programas de ajedrez para computadoras convencionales de arquitectura Von Neumann. Y es Marvin Minsky, del departamento de matemáticas de Princeton, quien construye el primer ordenador neuronal, SNARC, en 1951 [6]. Fue en esta universidad donde después de graduarse, John McCarthy organizó en el Dartmouth College (verano de 1956) un "workshop" al que invitó a investigadores interesados en la teoría de autómatas, las redes de neuronas y el estudio de la inteligencia. La reunión sirvió para poner en contacto a las principales figuras que dominarían durante los 20 años siguientes la nueva disciplina recién bautizada por McCarthy: la Inteligencia Artificial. Entre ellos se encontraban, Alan Newell y Herbert Simon, investigadores del Carnegie Tech, que construían un programa de razonamiento, el Logic Theorist (LT), capaz de probar teoremas matemáticos [7]. Minsky, McCarthy, Simon y Newell son considerados por los historiadores como los padres de la IA.

1.2.2 Entusiasmo y grandes expectativas (1952-1969)

Newell y Simon continuaron con sus investigaciones y construyeron el General Problem Solver (GPS) [8], que a diferencia del Logic Theorist, se diseñó como imitador de los protocolos humanos de solución de problemas en cuanto a la consideración de submetas y posibles acciones. Posiblemente éste fue el primer programa en incorporar el enfoque del "pensar como humano".

A principios de 1952, Arthur Samuel diseñó una serie de programas para el juego de las Damas con capacidades de aprendizaje. Con ellos echó por tierra la idea de que las máquinas tan sólo podrían realizar las tareas que se les encomendaran, ya que su programa aprendió rápidamente a jugar mejor que su creador.

John McCarthy cambió el Dartmouth College y se incorporó al MIT² y en 1958 hizo dos contribuciones importantes. En el laboratorio del MIT diseña y construye el Lisp, uno de los lenguajes de programación de alto nivel más antiguo que todavía sigue usándose en inteligencia artificial. Con el Lisp, McCarthy ya tenía la herramienta pero debía solucionar el problema de los escasos y costosos recursos de cómputo. Para resolverlo, crea junto a otros colaboradores el concepto de tiempo compartido, y basándose en este concepto, construye su Advice Taker [9], el primer sistema completo de IA. A diferencia de otros programas, incorporaba “conocimiento general del mundo” y permitía la inclusión de nuevos axiomas sin necesidad de reprogramarlo de nuevo.

En ese mismo año, Minsky coincide con McCarthy y se traslada al MIT para trabajar en los llamados **micromundos**, que no eran más que problemas limitados que necesitaban de inteligencia para llegar a la solución. De ellos, el más famoso fue el mundo de los bloques, formado por un conjunto de bloques sólidos colocados en la superficie de una mesa. Una de los problemas a resolver era reordenar los bloques de alguna forma determinada por medio de un robot que moviera un bloque en cada paso.

En 1963 se produjo la marcha de McCarthy a Stanford para trabajar sobre métodos de propósito general para razonamiento lógico.

Por otro lado, los trabajos enfocados a las redes neuronales de McCulloch y Pitts seguían creciendo, y son Bernie Widrow (1960) y Frank Rosenblatt (1962) quienes mejoran la regla de aprendizaje de Hebb y llaman a sus redes "Adaline" y "Perceptron" respectivamente.

1.2.3 Una dosis de realidad (1966-1974).

Es una época en la que las predicciones hechas durante otras etapas no se hacen realidad, fundamentalmente por el excesivo optimismo que resultó de la etapa anterior y que llevo a muchos investigadores a augurar un exitoso futuro. Con frecuencia se cita el comentario hecho por Simon:

Sin afán de sorprenderlos y dejarlos atónitos, debo informarles lisa y llanamente que actualmente en el mundo existen máquinas capaces de pensar, aprender y crear. Además, su capacidad para hacer lo anterior aumentará rápidamente hasta que —en un futuro previsible— la

² Massachussets Institute of Tecnology.

magnitud de problemas que tendrán capacidad de manejar irá a la par con la capacidad de la mente humana para hacer lo mismo.

Las dificultades empiezan a surgir entre los proyectos de investigación de IA cuando se constata que aquellos métodos que demostraban funcionar en uno o dos ejemplos sencillos, fallaban cuando se utilizaban en problemas más variados, o de mayor dificultad.

El primer tipo de obstáculo se originó en los antiguos programas, los cuales contenían muy poco o ningún conocimiento general de la materia objeto de estudio; su éxito dependía de manipulaciones sintácticas sencillas. Un buen ejemplo lo representan los traductores.

La segunda dificultad fue la intratabilidad de muchos de los problemas que la inteligencia artificial estaba intentando solucionar. La mayoría de los primeros programas de IA se basaban en la representación de las características básicas de un problema y se sometían a prueba diversos pasos, hasta que se llegara a encontrar aquella combinación de éstos que produjera la solución esperada. Esto funcionó en los primeros programas debido a que los micromundos con los que se trabajaba contenían muy pocos objetos. El hecho de que un programa encontrara una solución en principio, no quería decir que el programa contuviera cualquiera de los mecanismos necesarios para encontrarla en la práctica.

La tercera dificultad estaba relacionada con las limitaciones inherentes de las estructuras básicas usadas para generar comportamiento inteligente, en particular, los perceptrones, ya que según Minsky, "podrían aprender cualquier cosa que pudieran representar, pero podían representar muy poco". Un caso específico era la imposibilidad de capacitar a un perceptron de dos entradas a discernir si éstas eran diferentes. A partir de aquí, las subvenciones para la investigación en redes de neuronas fueron drásticamente reducidas.

1.2.4 Sistemas basados en conocimiento, ¿la clave del poder? (1969-1979)

Durante la primera década de investigación en inteligencia artificial el interés se había centrado en mecanismos de búsqueda de propósito general que intentaban encadenar pasos de razonamiento elementales para encontrar soluciones completas. Eran los llamados métodos débiles, debido a que la información sobre el dominio con la

que contaban era débil. En el caso de muchos dominios complejos, la "performance" también se volvía ineficaz. Por eso se trata de usar conocimiento más adecuado para seguir pasos de razonamiento más amplios y solucionar casos típicos en áreas limitadas de la experiencia. Se podría decir que, para solucionar un problema complicado, casi habría que conocer la solución. El programa DENDRAL [10], desarrollado en Stanford por Bruce Buchanan, constituye uno de los primeros ejemplos de este enfoque. El sistema infería una estructura molecular a partir de la información de su espectro de masas. Ciertos patrones conocidos del espectro de masas sugerían subestructuras comunes en la molécula y, reconociendo las subestructuras particulares, el número de candidatos solución se reducía drásticamente. La trascendencia de DENDRAL fue la de ser el primer sistema de conocimiento intensivo que lograba funcionar: sus conocimientos se basaban en importantes cantidades de reglas para propósitos específicos. En sistemas posteriores se incorporó también lo anteriormente propuesto por McCarthy, es decir, la separación del conocimiento (en forma de reglas) y la correspondiente al razonamiento.

También de esa época es MYCIN [11], de Feigenbaum, Buchanan y Shortliffe, dedicado al diagnóstico de las enfermedades infecciosas. Dos características lo diferencian de DENDRAL: la primera es que no existe ningún modelo teórico general desde el cual derivar las reglas. Se hace a partir de amplias entrevistas con los expertos. La segunda, que las reglas reflejan la incertidumbre asociada con el conocimiento médico por medio de factores de certeza que, al parecer correspondía muy bien a la manera según la cual los médicos ponderaban las evidencias al hacer un diagnóstico.

A éste siguieron otros procedimientos para la realización de diagnósticos médicos. Grupos numerosos del MIT se afanaban por encontrar un método para producir diagnósticos y tratamientos con base a las teorías de probabilidad y utilidad. Su objetivo era construir sistemas que produjeran las recomendaciones médicas óptimas más probables. De esta época es PROSPECTOR [12], un sistema de razonamiento probabilístico que provocó muchos comentarios al recomendar la realización de perforaciones de explotación en una ubicación geológica en donde posteriormente se encontraron importantes depósitos de molibdeno.

En este período se amplía el espectro de aplicaciones para problemas del mundo real lo cual provoca un aumento en la demanda de nuevos esquemas de representación

que sí funcionen, algunos basados en la lógica, como el lenguaje Prolog y otros siguiendo la idea de “frames³” de Minsky [13], jerarquía taxonómica de tipos de eventos y objetos particulares.

1.2.5 La Inteligencia Artificial se convierte en una industria (1980-1988)

El primer sistema experto comercial, R1 [14], empieza a operar en la DEC⁴. El sistema se utilizaba en la elaboración de pedidos de nuevos sistemas de computación. Es el ejemplo más sobresaliente en un período en el cual casi todas las grandes empresas tienen en plantilla grupos de IA, usando o investigando en la tecnología de los sistemas expertos. La industria, en especial los japoneses con el anuncio del proyecto "Quinta Generación", se vuelca con el desarrollo de herramientas “software” para la construcción de sistemas expertos, y en la construcción de “hardware” optimizado para el diseño de programas en Lisp y Prolog.

1.2.6 El retorno de las Redes de Neuronas (1986-presente)

En el período actual existe una cierta desilusión con respecto a la aplicabilidad de la tecnología de los sistemas expertos derivada de los sistemas tipo MYCIN: la construcción de un sistema experto necesita algo más que un sistema de razonamiento lleno de reglas, es decir, un modelo computacional de comportamiento inteligente.

Por otro lado, Hopfield y otros físicos retoman el estudio de las redes de neuronas. A ello contribuye el redescubrimiento del algoritmo de aprendizaje "back-propagation", descubierto ya en 1969. Las severas reducciones en los fondos destinados a la investigación en IA, y el postergamiento de las redes de neuronas frente a los sistemas expertos, ocasiona que sea ésta una época de rivalidades.

1.2.7 Sucesos recientes (1987-presente)

En esta época se produce un cambio en el contenido y en la metodología de investigación en IA. Ahora se construye sobre teorías existentes, basándose en teoremas

³ El correspondiente castellano es *marcos*, aunque está más extendido el término anglosajón.

⁴ Digital Equipment Corporation.

rigurosos o sólidas evidencias experimentales más que en la intuición, y en demostrar la utilidad de las aplicaciones en el mundo real más que crear ejemplos de laboratorio.

Un buen ejemplo de lo anterior es el campo de comprensión del lenguaje. Desde aproximaciones "ad hoc" frágiles, se ha pasado a enfoques basados en los modelos de Markov ocultos (HMM⁵), fundamentados en rigurosas teorías matemáticas y que han sido generados mediante un proceso de aprendizaje basado en un gran volumen de datos del lenguaje real.

Otro área beneficiada de la formalización es la planificación en la que, desde la planificación de sistemas que sólo funcionaban para los micromundos de 1970, se ha pasado a sistemas para la programación del trabajo en factorías y misiones espaciales, entre otras.

Actualmente existe un resurgir en la teoría de la decisión y en los sistemas de razonamiento estadísticos y cuasi-estadísticos. Con las redes de credibilidad [15] que permiten razonar eficientemente combinando evidencias inciertas, investigadores como Judea Pearl promueven la idea de un sistema experto normativo, es decir, un sistema que actúa racionalmente de acuerdo a las leyes de la teoría de la decisión y no intenta imitar a los expertos humanos. Una revolución similar se ha dado en robótica, visión por computadora, aprendizaje máquina (incluyendo redes de neuronas) y representación del conocimiento.

1.3 Conceptos de IA

1.3.1 Datos, información y conocimiento

Un aspecto básico que es necesario entender cuando se investiga en IA es la diferencia que existe entre datos, información y conocimiento [16]. Se entiende por *dato* el valor de un parámetro específico para un objeto en particular en un tiempo dado. El término *información* se refiere a datos estructurados, es decir, con un significado en un contexto determinado. Por otra parte el *conocimiento* se deriva a través de análisis formales o informales (o interpretaciones) de datos. Así pues, incluye el conjunto de teorías, relaciones, leyes, experiencias, reglas, etc., por las cuales, por una parte, una

⁵ Hidden Markov Models

información se forma a partir de los datos y, por otra, esa información puede usarse adecuadamente [17].

Machlup [18] hace una distinción clara entre información y conocimiento cuando dice que: *"La información puede adquirirse oyendo, mientras el conocimiento se adquiere pensando"*. En la Figura 1-1 pueden verse los diferentes niveles de tratamiento de los hechos, del conocimiento y de la información y el almacenamiento de ellos, unos en bases de datos y otros en bases de conocimiento.

En Medicina, por ejemplo, un dato sería una presión sanguínea de 180/110, o el informe de que el paciente ha tenido un ataque al corazón. Un ejemplo de información podría ser el registro médico de un paciente que incluye datos personales, resultados de laboratorio y diagnosis, etc. Cuando los médicos acumulan y analizan estos datos, pueden determinar que los pacientes con presión sanguínea alta son más propensos a tener ataques de corazón que los pacientes con presión sanguínea normal o baja. Este análisis produce un gránulo de conocimiento sobre el mundo.

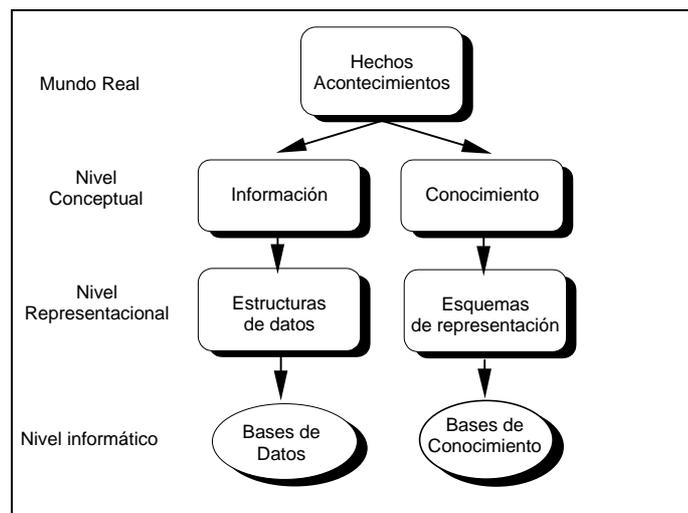


Figura 1-1: Niveles de tratamiento de hechos y acontecimientos

Hay que hacer constar, sin embargo, que la interpretación apropiada de estas definiciones depende del contexto. Es decir, el conocimiento en un determinado nivel de abstracción puede ser considerado como dato en niveles inferiores [19]. Una presión sanguínea de 180/110 es un dato sin tratar; la afirmación de que el paciente tiene hipertensión es una interpretación de ese dato, y de este modo representa un nivel mayor de conocimiento. En un proceso de toma de decisión para elaborar un diagnóstico es

posible que se requiera una indicación sobre la presencia o ausencia de hipertensión, en cuyo caso la presencia de hipertensión será tratada como un ítem de dato.

El conocimiento puede dividirse en tres componentes: hechos, procedimientos y heurísticas. Son *hechos* las declaraciones que relacionan algunos elementos de la realidad con referencia al área específica. Los *procedimientos* son reglas bien definidas e invariables que describen secuencias fundamentales de eventos y relaciones que conciernen al área. Las *heurísticas*, también denominadas “shortcuts” o “thumb-rules”, son generalmente acuñadas por expertos en el área y representan conocimiento informal, que permite alcanzar una solución a un problema sin tener que llevar a cabo un análisis detallado de la situación particular [20]. El experto acumula las heurísticas a través de su experiencia con problemas solucionados con anterioridad de forma satisfactoria, y con problemas similares no resueltos con éxito. Es posible que los detalles del análisis original del problema no sean conocidos o recordados, pero se reconoce que una aproximación similar surtió efecto para un problema similar y que esta misma aproximación será probablemente la más acertada para tratar el problema en curso.

Se denomina compilación de conocimiento al proceso de adquisición y organización de la información por parte de un individuo, así como a la definición de la forma y las condiciones del uso posterior, de forma que la recuperación sea efectiva y eficiente. En la Figura 1-2 puede verse que el proceso de compilación ocurre de dos formas complementarias. La primera consiste en el estudio formal de ciertas materias a través de la literatura especializada. Como resultado el conocimiento se encapsula en definiciones, axiomas y leyes constituyendo las teorías formales y los principios aceptados de las distintas disciplinas. Generalmente, quien posee esta forma de conocimiento no sabe cómo aplicarlo de forma práctica aunque es capaz de describirlo. Una segunda forma de compilar el conocimiento es bien a través de la experiencia de un experto, o bien de la experiencia propia. Para ello, en un principio se aprenden los hechos específicos del dominio, para luego, más tarde, aprender del experto las heurísticas o reglas prácticas de resolución de problemas o desarrollar las suyas propias.

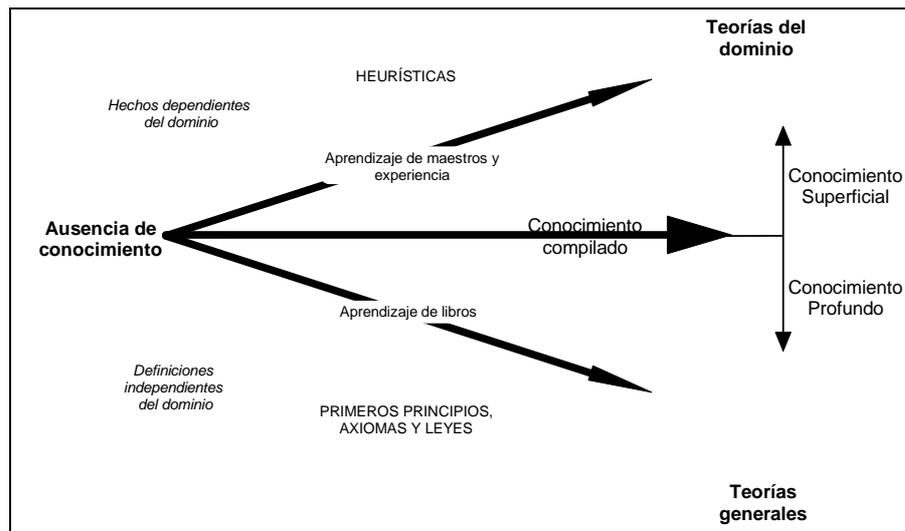


Figura 1-2: Clasificación del conocimiento

Mientras una persona no experta puede realizar una aproximación al problema de una forma sistemática, empleando una metodología específica orientada al problema, esta aproximación podría ser demasiado complicada y estar sujeta a errores, o incluso ser una tarea que requiera mucho esfuerzo y tiempo. Un experto, por otro lado, tiene un porcentaje de éxito mucho mayor en la solución de problemas, ya que ha adquirido a lo largo del tiempo un conjunto de potentes relaciones causa-efecto basadas en su experiencia, que utiliza para reconocer rápidamente las características destacadas del problema, categorizarlas de acuerdo a estas características y concebir correctamente una solución [20].

¿Qué ventajas ofrecen las técnicas heurísticas frente a las técnicas tradicionales de solución de problemas? Las técnicas algorítmicas son detalladas y muy precisas pero posiblemente inadecuadas debido al esfuerzo y tiempo de desarrollo. Por otra parte, las técnicas heurísticas que no son ni concienzudas ni detalladas, pero probablemente son casi más precisas y reducen considerablemente el tiempo y el esfuerzo requeridos. Sin embargo, sólo un verdadero experto es capaz de realizar dicha tarea, con un mayor riesgo de error.

1.3.2 Representación del conocimiento

En su Turing Award Lecture 21, Newell y Simon argumentaron que cualquier actividad inteligente, ya fuera humana o máquina, se consigue a través del uso de:

1. Patrones de símbolos para representar aspectos significativos del problema.

2. Operaciones sobre esos patrones para generar posibles soluciones al problema.
3. Búsqueda para seleccionar una solución entre las diversas posibilidades.

Estas afirmaciones forman la base de lo que se conoce como *hipótesis del sistema físico de símbolos*, y hacen referencia a uno de los principales focos de investigación y desarrollo en IA: la representación de conocimiento, es decir, la definición de las estructuras de símbolos y operaciones necesarias para solucionar inteligentemente el problema, y el desarrollo de estrategias para buscar de una forma eficiente y correcta las soluciones potenciales generadas por estas estructuras y operaciones [2]. Estas son las dos cuestiones interrelacionadas de *representación de conocimiento y búsqueda*.

La función de cualquier esquema de representación es capturar las características esenciales del dominio de un problema, y hacer que la información esté accesible a un procedimiento de solución de problemas. Dos son las características deseables de un esquema de representación: la *expresividad*, de forma que permita que el programador sea capaz de expresar el conocimiento necesario para la solución del problema; y, por otra parte la *eficiencia*, referida al consumo de recursos del programa resultante. Además, el lenguaje de representación elegido debe manejar conocimiento cualitativo, debe permitir obtener nuevo conocimiento a partir de hechos básicos del dominio, debe permitir la representación tanto de principios generales como de situaciones específicas, debe capturar semánticas complejas, como estructuras clase-objeto, relaciones causa-efecto, etc., y, por último, debe permitir la inclusión de meta-conocimiento, o “conocimiento sobre el conocimiento” para explicar cómo soluciona el problema y por qué toma ciertas decisiones.

1.3.3 Espacio de estados y Búsqueda

Para explicar la segunda afirmación de Newell y Simon, en la que se argumenta que los problemas se solucionan por medio de una búsqueda entre alternativas, es necesario explicar un concepto clave en IA: el espacio de estados.

La definición de un problema que sea adecuado para ser resuelto mediante técnicas de IA debe hacerse en términos de estados del problema y acciones que pueden llevarse a cabo, con el fin de alcanzar un estado-meta propuesto como objetivo. Es decir, hay que definir un estado inicial y un conjunto de operadores permitidos que serán

los encargados de provocar acciones-transiciones entre estados. Estos dos elementos configuran lo que se llama *espacio de estados*: el conjunto de todos los estados que pueden alcanzarse a partir del estado inicial mediante una secuencia de acciones [1].

El concepto de búsqueda a través de estructuras de datos ha sido un concepto fundamental en algoritmos de computación. Sin embargo, la *búsqueda en IA* es un concepto diferente ya que el objeto de la búsqueda es el espacio de estados de un problema y el investigador de IA necesita encontrar un camino que conecte la descripción inicial del problema con la descripción del estado deseado, es decir, el problema resuelto. Este camino representa los pasos de solución del problema, y el proceso de búsqueda de la solución al problema desarrolla un *espacio solución*, o sea, la porción del espacio del problema que actualmente está siendo examinada [20].

Existen diferentes métodos de búsqueda, desde los más sencillos a los más complejos, y su aplicación depende de la naturaleza del problema a resolver: primero-en-profundidad, primero-en-anchura, ascenso a colinas, mejor primero, búsqueda A*. Para problemas complejos, los métodos de búsqueda informados parecen la mejor alternativa, frente a los métodos de búsqueda ciega, donde se exploran casi todos los caminos. La búsqueda dirigida permite incorporar cierta clase de conocimiento en forma de *funciones heurísticas* que guíen el proceso de búsqueda, como el cálculo del coste de una ruta determinada o la longitud del camino a la meta, con lo cual evitan una explosión combinatoria a la hora de obtener una solución. Dichas funciones heurísticas son diferentes de las heurísticas utilizadas por parte del experto, más específicas de un dominio en particular y más profundas en su naturaleza.

1.4 Sistemas Expertos

Los sistemas expertos (SSEE) son sistemas computerizados contruidos con técnicas de IA que utilizan el conocimiento sobre algún dominio para obtener la solución a un problema de ese dominio. La solución es esencialmente la misma que la concluida por un experto en el dominio cuando se enfrenta con el mismo problema [20].

En la Figura 1-3 se muestra la clasificación en niveles de los sistemas inteligentes contruidos con técnicas de IA [22]. Lo que realmente distingue a los sistemas expertos de la programación convencional o de cualquier técnica de búsqueda de general son tres características:

1. La separación entre el conocimiento y la forma en que es usado.
2. El uso de conocimiento del dominio muy específico; y
3. La naturaleza heurística mas que algorítmica del conocimiento empleado.

La primera idea nace del desarrollo del GPS de Newell y Simon, que solucionaba problemas encontrando una secuencia de operadores que eliminaban la diferencia entre el estado inicial del problema y uno de los estados meta. Dichos operadores representaban conocimiento general sobre qué operaciones eran posibles dentro del dominio. El programa usaba técnicas de búsqueda para encontrar la secuencia adecuada de operadores que progresivamente minimizaban la distancia entre el estado inicial y la meta del problema.

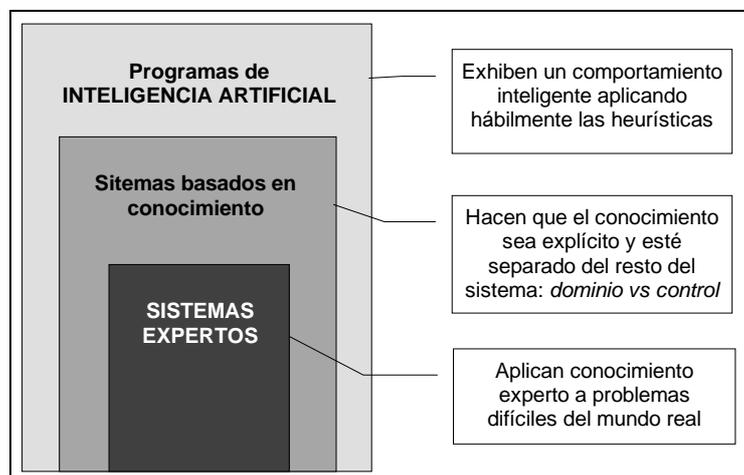


Figura 1-3: Clasificación en niveles de los sistemas inteligentes

El segundo concepto fue inicialmente explorado durante el desarrollo de DENDRAL, y más tarde con Meta-DENDRAL. La tercera idea surge a partir de la capacidad de los seres humanos de solucionar problemas complicados sin el uso continuo de un modelo o un algoritmo. El desarrollo de MYCIN marcó un hito fundamental en el desarrollo de sistemas expertos y provocó la fusión de estas tres ideas. Los investigadores se dieron cuenta que las estructuras básicas que MYCIN usaba para manipular el conocimiento y llevar a cabo la diagnosis y tratamiento de la enfermedad podrían ser usadas con conocimiento de otros dominios y ejecutar el mismo estilo de

diagnosis. Eliminando el conocimiento específico del dominio se podrían quedar con los elementos esenciales de MYCIN, es decir, el *shell*⁶ vacío llamado EMYCIN.

1.4.1 Historia de los SSEE

En la corta historia de estos sistemas se pueden distinguir 3 épocas:

1. **Época de iniciación** (1965-70), en la que se desarrollan los sistemas DENDRAL y MACSYMA [23], desarrollados en Stanford y MIT. El primero, utilizado para inferir estructuras plausibles de componentes químicos desconocidos a partir de análisis de espectrometría de masas, resonancia magnética nuclear y otros datos de experimentos químicos, empleaba una variante del método generación-y-prueba como mecanismo de búsqueda. El sistema fue más tarde completado con conocimiento de análisis en Meta-DENDRAL.

MACSYMA realizaba cálculos simbólicos de integrales y diferenciales y destacaba simplificando expresiones simbólicas. Incorporaba cientos de reglas obtenidas de expertos en matemática aplicada que representaban un modo de transformar una expresión en un equivalente. La solución al problema requería encontrar un enlace de reglas que transformara la expresión original en una adecuadamente simplificada.

2. **Época de experimentación y desarrollo** (1970-80), en la que aparecen los sistemas expertos más conocidos: CADUCEUS, MYCIN, PROSPECTOR y HEARSAY-II.

CADUCEUS [24] incorporaba el conocimiento de aproximadamente 100.000 relaciones entre síntomas y diagnósticos de medicina interna, representando el 85% de todo el conocimiento relevante. Hay que destacar que también incorporaba algunas sofisticadas estrategias para distinguir múltiples diagnósticos.

MYCIN, quizás el más importante, resolvía problemas de diagnóstico y tratamiento de enfermedades infecciosas. El sistema incorporaba alrededor de

⁶ Puede traducirse como concha, aunque se prefiere el término inglés más conocido.

400 reglas heurísticas relacionando posibles condiciones con interpretaciones asociadas. Aunque el propósito principal del sistema era servir como un programa de consulta, se le añadieron tres funciones adicionales: (1) un módulo de *pregunta-respuesta*, que respondía a preguntas sobre una consulta específica o sobre detalles del conocimiento del sistema; (2) un mecanismo de *explicación* de las razones por las cuales el sistema requería cierto dato o bien emitía una conclusión; y (3) un módulo de *adquisición* para incorporar más conocimiento a través de un diálogo con el experto.

Una de las principales aportaciones de MYCIN, además de sus facilidades de explicación del razonamiento, ha sido sin duda la introducción de un mecanismo de imprecisión como variable en el conocimiento, permitiendo de esta forma asignar a los objetos del dominio grados de certeza que representaban la confianza que un experto en el área confería a un determinado dato. Hoy en día, los factores de certeza también se usan para propagar los procesos de razonamiento. Posteriormente fue construida una versión independiente de MYCIN, llamada EMYCIN, eliminando el conocimiento de enfermedades sanguíneas infecciosas, y que permitía el desarrollo de sistemas expertos, como lo fue PUFF [25].

El desarrollo de PROSPECTOR fue estimulado por el éxito de MYCIN y también como él poseía capacidades de explicación y adquisición de conocimiento. Su propósito consistía en evaluar prospecciones geológicas con el fin de hallar yacimientos minerales. Al igual que MYCIN, determinaba las hipótesis más plausibles calculando el grado de apoyo de cada evidencia. Este proceso se aplicaba recursivamente hasta que todas las evidencias relevantes eran obtenidas y combinadas heurísticamente. Su espaldarazo definitivo ocurrió en 1982, cuando predijo con éxito, pese a la incredulidad de los expertos, la existencia yacimientos de molibdeno en una zona de Washington.

De esta época también es HEARSAY-II [26], desarrollado en la Universidad de Carnegie-Mellon para la comprensión de la voz hablada, que no alcanzó los éxitos de los precedentes en cuanto a performance frente a los expertos, si bien la tarea es hoy en día una de las más complicadas para los investigadores de IA. Una de las características más importantes del sistema es

que empleaba múltiples SSEE colaborando que se comunicaban a través de una pizarra⁷. Los múltiples especialistas permitían que la solución del problema pudiera llevarse a cabo con diferentes niveles de abstracción.

Por último citar a CASNET [27] para el diagnóstico y terapia del glaucoma cuya aportación fue la incorporación de un esquema general para modelizar diagnósticos, plasmado en EXPERT, una herramienta general de construcción de sistemas expertos.

3. Etapa de **industrialización** (1980-), en la que es interesante mencionar a STRIPS, un sistema experto de planificación para robots móviles, que abordaba el problema de submetas conflictivas y proporcionaba un primitivo modelo de aprendizaje; MOLGEN, usado para análisis y síntesis del DNA ; y R1, actualmente llamado XCON, para la configuración de computadoras DEC VAX.

1.4.2 Componentes de un Sistema Experto

Los tres componentes básicos de un sistema experto, que aparecen en la Figura 1-4, son:

- *Base de conocimientos*: El corazón del sistema experto contiene todo el conocimiento necesario y relevante para la solución de problemas, que es específico del dominio y que ha sido recopilado por el ingeniero de conocimiento a través de las fuentes de conocimiento que haya tenido disponibles (expertos en el área, libros, ...) [20]. Este conocimiento se encuentra almacenado en dos subestructuras: la *base de hechos*, que forma el esqueleto declarativo y su misión es la de articular a todos los hechos potencialmente relevantes del dominio; y la *base de conocimientos*, que es la que alberga todo el conocimiento procedimental del sistema [28]. Este conocimiento puede verse desde dos perspectivas: su naturaleza, es decir, si es algorítmico o *heurístico*, y su formato, que se refiere a cómo ese conocimiento se representa internamente dentro del sistema experto de modo que pueda ser usado en la solución de problemas. De entre los

⁷ Traducido del término inglés *blackboard*, es una arquitectura para la comunicación asíncrona de fuentes de conocimiento independientes centradas en aspectos relacionados de un mismo problema [2].

esquemas de representación de conocimiento más destacados, hay que citar las reglas de producción, lógica de predicados, redes asociativas y frames.

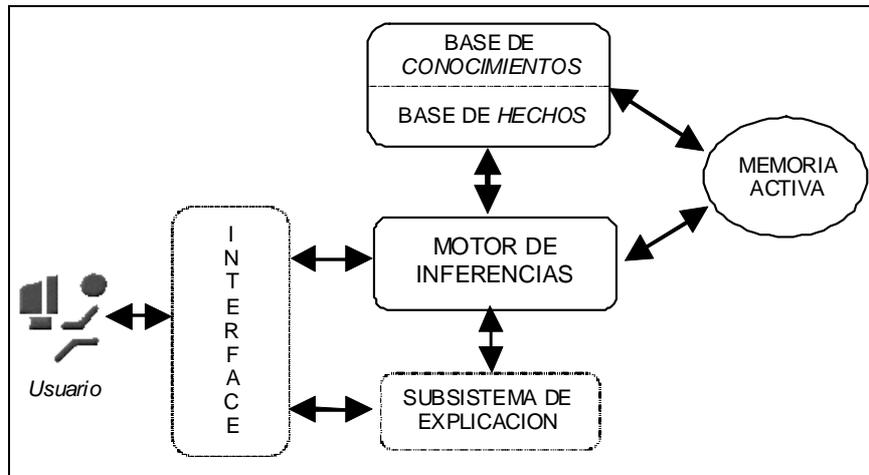


Figura 1-4: Arquitectura típica de un sistema experto

- *Motor de inferencias*: Consta fundamentalmente de dos entidades: un *intérprete* y una *estrategia de control*. En conjunto no es más que un programa de naturaleza secuencial que interpreta el conocimiento almacenado en la base de conocimientos y contiene mecanismos para:
 - Examinar la memoria activa y derivar conclusiones y datos adicionales.
 - Controlar y organizar la utilización del conocimiento albergado en las estructuras de representación en el proceso de razonamiento.
 - Intentar encontrar conexiones entre los estados iniciales del problema y los estados solución, bien trabajando desde las premisas hacia las conclusiones (razonamiento hacia adelante), o desde las soluciones a los datos iniciales (razonamiento hacia atrás), o desde ambos simultáneamente (razonamiento bidireccional). El método elegido dependerá de las características del dominio del problema y del razonamiento del experto [20].
- *Memoria activa*: También llamada memoria de trabajo, es la estructura que contiene toda la información de naturaleza estática necesaria para resolver el problema concreto, es decir, datos iniciales, datos incorporados posteriormente, hechos establecidos durante el razonamiento, e hipótesis de

trabajo, metas o submetas que todavía no han sido establecidas. Es la estructura que describe el estado actual del sistema [28].

- *Interfaz de explicación*: proporciona al usuario final un medio de comunicación atractivo con el sistema experto. Entre sus funciones cabe destacar:
 - Proporcionar al sistema la capacidad de formular preguntas al usuario sobre el problema.
 - Facilitar explicaciones sobre el porqué de ciertas preguntas del programa inteligente.
 - Permitir al usuario que pregunte al sistema sobre el porqué o el cómo de ciertas decisiones particulares.
 - Presentar una salida de los resultados obtenidos.
- Aunque no se puede considerar como un componente como tal, existe un elemento esencial para el desarrollo de un sistema experto, la *herramienta de adquisición de conocimiento*. Esta herramienta, también llamada shell, asiste al ingeniero de conocimiento en la construcción de la base de conocimientos. El ingeniero de conocimiento es la persona encargada de elaborar un modelo computacional de comportamiento inteligente en un dominio dado. Ello incluye la obtención de conocimientos del área del experto así como todo tipo de información complementaria como esquemas de razonamiento usados y heurísticas del dominio.

1.4.3 Sistemas expertos basados en reglas

Uno de los esquemas de representación más extendidos para la construcción de la base de conocimientos del sistema experto son las *reglas de producción*. Las reglas son métodos procedimentales de representación de conocimiento cuyo formato es *IF <condición> THEN <acción>* (o <conclusión>, o ambas). Las razones de su amplia difusión pueden atribuirse a su excelente capacidad para representar conocimiento heurístico, a la facilidad de implementar y comprender posteriormente este conocimiento y a que son una forma muy natural de expresar el conocimiento, más

cercana al modo en que los expertos describen sus propias técnicas de solución de problemas [20].

Los sistemas expertos basados en reglas, denominados *sistemas de producción* pueden clasificarse atendiendo a su estructura de control en [28]:

1. *Sistemas dirigidos por los datos*: las *inferencias*⁸ en el proceso de razonamiento se obtienen cuando los antecedentes de alguna (o más) de sus reglas de producción se emparejan con, al menos, una parte de los hechos que describen el estado actual del sistema. Cuando esto ocurre, se dice que la regla en cuestión se ha activado, y está en condiciones de ser ejecutada.
2. *Sistemas dirigidos por los objetivos*: los antecedentes y los consecuentes de las reglas deben ser considerados como aserciones sobre los datos. En este caso, la activación de las reglas tiene lugar por medio de un encadenamiento regresivo, y el emparejamiento se efectúa a través de las conclusiones de las reglas. Para alcanzar una meta, por tanto, hay que llevar a cabo un proceso evocativo en el que, de forma recursiva, se vayan estableciendo los antecedentes de las metas como submetas de orden inferior.

La implementación de bases de conocimiento con estructuras procedimentales del tipo de las reglas de producción presenta una serie de ventajas e inconvenientes que a continuación se enumeran [20].

Como ventajas hay que señalar:

- *Modularidad*: Cada regla es una unidad separada de conocimiento que puede añadirse, modificarse o eliminarse independientemente del resto de reglas existentes, lo cual hace más sencilla la tarea de diseño y verificación de la base de conocimientos por parte del ingeniero de conocimiento.
- *Uniformidad*, porque todo el conocimiento del sistema está expresado en el mismo formato y no requiere que el ingeniero cambie constantemente su forma de pensar.

⁸ *Inferencia* es el proceso que permite la comprensión de un significado en función de cierta información relacionada

- *Naturalidad*, que viene implícita en la propia estructura de las reglas.

En cuanto a los inconvenientes:

- *Adición de nuevo conocimiento*, que podría ser contradictorio, problema que puede ser difícil de localizar y corregir a medida que la base de conocimientos crece en tamaño y complejidad.
- *Ineficiencia*, ya que durante el ciclo del motor de inferencias se examina cada regla de la base de reglas con el propósito de determinar si dicha regla se puede o no aplicar a la situación actual.
- *Opacidad*, ya que es difícil examinar una base de conocimientos ya construida y determinar qué acciones van a ejecutarse. Esto está causado por la propia modularidad del conocimiento, que mientras facilita la tarea de tratamiento individual de cada regla, crea una perspectiva global difícil de entender.
- *Explosión combinatoria*, especialmente en dominios complejos con muchas variables de entrada al sistema, como puede ser el control del tráfico aéreo, lo cual obliga a incorporar muchas reglas al sistema dificultando el proceso de desarrollo, verificación y mantenimiento posterior.

1.4.4 Clasificación de los SSEE

Los sistemas expertos pueden clasificarse atendiendo a la naturaleza de la tarea a resolver, al tipo de interacción con el usuario y al tipo de dependencia con el tiempo [2][22][29][30]

Según el tipo de tarea:

- Sistemas de *clasificación o interpretación*, que infieren descripciones de situaciones a partir de datos medidos. Ejemplos de este tipo son aplicaciones al reconocimiento de voz, análisis de imagen e interpretación de señales.
- Sistemas de *predicción*, que infieren consecuencias a partir de situaciones dadas. Se pueden aplicar a la predicción de clima, desarrollo de mercados, evolución de cosechas y predicción militar.

- Sistemas de *diagnóstico*, que infieren el correcto o incorrecto funcionamiento del sistema al cual están conectados y posibles causas a partir de observaciones y muestras. Ejemplos clásicos son los sistemas expertos para el diagnóstico médico, localización de fallos en circuitos eléctricos y detección de averías en reactores nucleares.
- Sistemas de *diseño*, que configuran objetos a partir de unas especificaciones, requisitos y restricciones iniciales. Ejemplos: diseño de circuitos electrónicos o edificios.
- Sistemas de *planificación*, que diseñan un plan de acciones para lograr unos objetivos dados, según condiciones y restricciones previamente especificadas. Son ejemplos característicos la planificación de robots, de rutas y estrategias militares.
- Sistemas de *monitorización*, que realizan un análisis continuo y periódico de señales recibidas de un sistema físico real, y activan señales o alarmas si se detecta un funcionamiento anormal. Ejemplos: monitorización de lecturas de instrumentos en plantas nucleares y monitorización de pacientes en unidades de medicina intensiva.
- Sistemas de *enseñanza*, cuya misión es el diagnóstico y depuración del comportamiento de estudiantes. Para ello construyen un modelo de lo que el estudiante sabe y de cómo aplica ese conocimiento para resolver un problema propuesto, corrigiendo las deficiencias encontradas.
- Sistemas de *control*, que se encargan de interpretar repetidamente la situación actual, predecir el futuro, diagnosticar las causas de problemas no declarados, formular planes de remedio y monitorizar su ejecución para lograr el éxito. Ejemplos: control de tráfico aéreo, gestión de negocios y control de misiones espaciales.

Según el tipo de interacción:

- Sistemas de *ayuda*, en los cuales el usuario acepta o rechaza las soluciones a los problemas que le presenta el sistema experto, en cuyo caso debe encontrar otra solución.

- Sistemas de *solución única*, en los cuales el sistema busca una única solución, normalmente la mejor. El sistema es la autoridad final en la toma de decisión.
- Sistemas de *crítica*, en los que el usuario usa el sistema para confrontar su solución al problema con la que le ofrece el sistema. Éste a su vez analiza y realiza comentarios acerca de la solución propuesta por el usuario. Estos sistemas pueden implementarse como sistemas de enseñanza en la formación de profesionales.

Según la dependencia con el tiempo:

- Sistemas temporales, donde el tiempo de toma de decisiones es limitado y, por consiguiente, existen restricciones importantes a los algoritmos de búsqueda.
- Sistema atemporales, donde el tiempo es "teóricamente" ilimitado, o en aquellos donde no hay una dependencia temporal de la información.

1.4.5 Etapas en la construcción de un Sistema Experto

La construcción y desarrollo de un sistema experto es un proceso que consta de dos fases principales tal y como se ve en la Figura 1-5, si bien entre ellas existe una constante reformulación de conceptos, rediseño de representaciones, y refinamiento del sistema implementado, a lo cual contribuyen las críticas y sugerencias del experto [29][22].

La primera fase incluye la identificación y conceptualización del problema:

- *Identificación*: El ingeniero de conocimiento y el experto determinan las características importantes del problema. Esto incluye la identificación del problema en si (i.e., tipo y alcance), la identificación de participantes adicionales, recursos requeridos (i.e., fuentes de conocimiento, tiempo, recursos computacionales y dinero) y las metas y objetivos de la construcción del sistema experto.

- *Conceptualización*: El ingeniero y el experto deciden qué conceptos, relaciones y mecanismos de control son necesarios para describir la solución a los problemas del dominio.

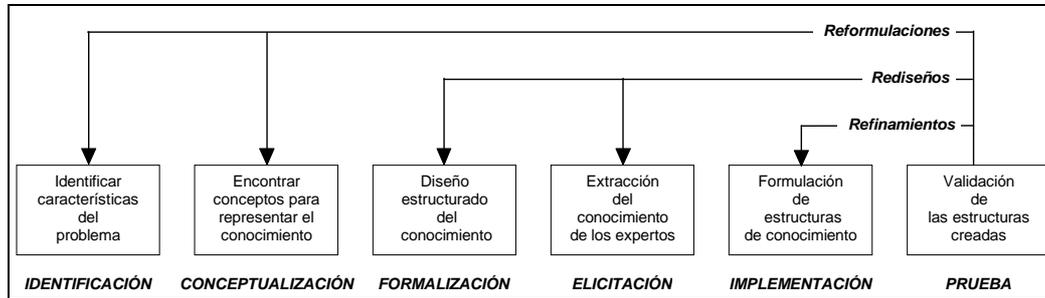


Figura 1-5: Proceso general de desarrollo de un sistema experto

La segunda fase consta de formalización, elicitación, implementación y prueba:

- *Formalización*: En esta etapa se expresan los conceptos clave y relaciones en una representación adecuada y más formal basada en diferentes esqueletos o herramientas de ingeniería de conocimiento.
- *Elicitación*: Es un proceso de extracción del conocimiento de los expertos humanos, que se realiza de una forma estructurada y consistente con el proceso de conceptualización..
- *Implementación*: Se establece una correspondencia entre el conocimiento formalizado en la etapa anterior y el esqueleto representacional asociado con la herramienta elegida para el problema.
- *Prueba*: El proceso de prueba involucra la evaluación del sistema prototipo y el esquema representacional usado para implementarlo. Además, la prueba debería incluir una amplia variedad de ejemplos para determinar la posible debilidad en la base de conocimiento o en el motor de inferencia.

1.5 Informática Médica

Hace más de 35 años que informáticos y médicos reconocieron que las computadoras podrían suponer una ayuda en las tareas de decisión médica. Las primeras referencias en las que se apuntaba la posibilidad de construir sistemas automáticos de este tipo en el dominio clínico datan de los años 60 [31][32] y los primeros prototipos demuestran su utilidad escasos años después, en 1964 [33]. Con la aparición de la

Inteligencia Artificial ha sido posible plantear vías alternativas a los sistemas de computación clásicos facilitando al clínico el tratamiento de la información de alto nivel que utiliza durante el desarrollo de su labor. La última década ha visto una revolución radical en el papel del ordenador en la práctica clínica y del papel único de los sistemas inteligentes de ayuda en la diagnosis y tratamiento, han pasado a ocupar un además un puesto como gestores de información, reduciendo la sobrecarga que pesa sobre la rutina clínica almacenando, indexando y recuperando todo tipo de datos médicos [34] mejorando la asistencia al paciente, y minimizando los costes.

1.5.1 Definiciones

Para introducir el tema es necesario definir una serie de conceptos propios del área conocida como Informática Médica.

Si la psicología significa literalmente “la lógica de la vida”, y la patología es “la lógica del diagnóstico”, entonces la informática médica es “la lógica de la atención a la salud”. (Enrico Coiera) [35]

La Informática Médica⁹ es una idea nacida en Europa para definir la aplicación de la tecnología de la información a cualquier área sanitaria. Hablando en términos de función, es el punto de encuentro entre la asistencia sanitaria y la tecnología. He aquí otras definiciones más formales:

Cuerpo de desarrollo de conocimiento y un conjunto de técnicas concernientes con la gestión organizada de la información como soporte de la investigación médica, educación y asistencia del paciente [...]. Combina la ciencia médica con diferentes tecnologías y disciplinas de las ciencias de la información, y de las ciencias de computación, y proporciona metodologías que contribuyan a un mejor uso de la base de conocimiento médico y en último término a una mejor asistencia médica. (Asociación de Colegios Médicos Americanos)

Aplicación de sistemas y tecnología de computadoras, de comunicaciones y de información a todos los campos de la medicina, es decir, asistencia, educación e investigación. (M.F. Collen en MEDINFO'80)

Estudio y uso de computadores e información en la asistencia médica.

⁹ Ampliamente conocida como *Medical Informatics*.

Ciencia de información que optimiza el análisis, almacenamiento, recuperación y transferencia computacional de datos de asistencia clínica y de pacientes.

Campo que concierne con las tareas de comunicación, procesamiento de información y tareas cognoscitivas de la práctica médica, la educación y la investigación, incluyendo la ciencia de la información y la tecnología para soportar estas tareas. (Robert Greenes y Edward Shortliffe en JAMA, Febrero 1990)

1.5.2 Sistemas de Ayuda a la Decisión Médica

De entre todas las aplicaciones de la tecnología al campo médico, el soporte a la decisión ha convertido al área médica en una de las disciplinas del campo tecnológico con un mayor empuje en los últimos años. Un *sistema de soporte o ayuda a la decisión* clínica es cualquier software diseñado para ayudar en la toma de decisiones a cualquier profesional de la salud. Esta definición alberga cualquier tipo de sistema que haga más sencilla la tarea del médico, simule o no los métodos de razonamiento del clínico. Los primitivos sistemas, desarrollados después de los años 50, no intentaban imitar este comportamiento sino que hacían hincapié en los datos, y por ello se consideran como clásicos o convencionales, frente a los que intentan modelar los procesos cognoscitivos del razonamiento médico apoyándose en técnicas de Inteligencia Artificial para manejar conocimiento, que podríamos tildar de inteligentes. Entre los primeros hay que destacar los métodos algorítmicos y los métodos de clasificación de patrones estadísticos (Bayes, discriminación lineal, análisis de bases de datos, etc.). Entre los segundos, citaremos a los sistemas expertos como su más claro exponente.

1.5.3 Inteligencia Artificial en Medicina

El campo de la IA en Medicina (IAM) ha evolucionado los últimos 15 años como una disciplina creciente y muy activa. A finales de los 60, con la implementación de una serie de sistemas basados en inteligencia artificial por parte de la comunidad investigadora, comenzaba lo que Clancey y Shortliffe definían como [35]:

La IA en Medicina está en principio relacionada con la construcción de programas de IA que ejecuten diagnósticos y elaboren recomendaciones terapéuticas. A diferencia de las aplicaciones médicas basadas en otros métodos de programación, como los métodos probabilísticos o estadísticos puros, los programas de IA médicos están basados en modelos simbólicos de entidades diagnósticas y sus relaciones con factores y manifestaciones clínicas del paciente.

Hoy en día, esta definición sería considerada corta, ya que las aplicaciones de diagnóstico asistido por computador en la rutina clínica reciben menos interés en favor de aplicaciones de sistemas expertos en laboratorios, entornos educativos, vigilancia clínica o en áreas de gran riqueza de datos, como entornos de cuidados intensivos. Sin embargo, la introducción de esta tecnología ha sido más lenta que en otras actividades humanas, principalmente por el propio escepticismo médico y a causa de otra serie de obstáculos, como son los siguientes [36]:

- la complejidad del cuerpo humano y de los procesos de enfermedad.
- el conocimiento relativamente superficial que se tiene de las mayoría de enfermedades.
- la gran cantidad de conocimiento relevante incluso a cualquier especialidad médica restringida.
- falta de familiaridad con la tecnología informática del personal clínico.
- las excesivas demandas temporales sobre la práctica clínica.
- la variación de la práctica médica entre las diferentes escuelas de pensamiento.
- el pequeño margen de error a causa de los riesgos de mala práctica o de implicaciones éticas.

A pesar de ello, existen dos factores importantes que juegan a favor, como son la creciente disponibilidad de potentes ordenadores, con menores costes y mayor facilidad de uso así como herramientas software mas amigables; y, por otro lado, la velocidad de crecimiento del conocimiento médico, que hace necesaria una mayor especialización del médico y su colaboración más estrecha con otros especialistas, asi como la disponibilidad de mecanismos de almacenamiento y recuperación de dichos datos.

En resumen, existen una serie de razones básicas por las cuales las computadoras son de gran utilidad en el campo de la medicina clínica [37]. En concreto, su utilización mejora:

- la exactitud del diagnóstico médico usando aproximaciones sistemáticas, completas y que pueden integrar datos procedentes de diversas fuentes.

- la fiabilidad de las decisiones clínicas evitando influencias de casos similares pero no idénticos (una fuente común de errores clínicos), y explicitando los criterios de decisión que, por lo tanto, se convierten en inmediatamente irreproducibles.
- la relación coste-eficacia de las distintas pruebas y terapias, haciendo un balance de tiempo, dinero o inconvenientes frente a beneficios y riesgos de determinadas acciones.
- la comprensión humana de la estructura del conocimiento médico, desarrollando consecuentemente las técnicas apropiadas para identificar la falta de adecuación o las inconsistencias de dicho conocimiento
- la comprensión de los procesos de toma de decisión clínica, y los procesos de educación médica con el fin de elaborar programas que sean cada vez más eficaces y fáciles de comprender.

Una lista actualizada de sistemas expertos aplicados en el campo médico puede encontrarse en la lista que actualiza Enrico Coiera [38].

1.6 Monitorización Inteligente en Medicina

El incremento de sofisticación de los dispositivos médicos trae consigo efectos contrapuestos. A pesar de que los avances de la tecnología biomédica proporcionan una potencia sin igual en la diagnosis, monitorización, tratamiento e interpretación de la vasta cantidad de información que genera, normalmente suponen un problema por la excesiva demanda sobre las habilidades cognoscitivas del personal de asistencia clínica. El almacenamiento, recuperación, procesamiento y presentación de esta información supone un desafío significativo. Estos problemas se agudizan en la mayoría de entornos de cuidados críticos como las unidades de cuidados intensivos (UCI) o las salas de operaciones donde ocurren eventos peligrosos para la vida que requieren una atención inmediata para corregirlos. Aunque los métodos y técnicas de ingeniería intentan aliviar estos problemas de sobrecarga de información con más dispositivos de monitorización integrados, consolas de control, sensores más fiables y técnicas avanzadas de procesamiento de señales, existen muchas lagunas en el entorno crítico que intentan cubrir la aplicación de técnicas de IA, con sistemas expertos y sistemas de monitorización inteligente, en último término [39].

1.6.1 Monitorización: Una definición

Monitorizar es el proceso de observación del comportamiento de un sistema físico, en este caso el paciente, con el fin de dirigirlo hacia un determinado objetivo [39]. Implica la interpretación de unos datos de entrada y reconocer en ellos condiciones o estados de alarma [40]. Si a esto añadimos capacidades de gestión en el sentido de toma de decisión en cuanto a las posibles intervenciones requeridas sobre el paciente, tenemos un sistema de monitorización de pacientes. En la Figura 1-6 está representado el esquema global de un proceso de monitorización clásico.

A la vista del esquema de la Figura 1-6, el conocimiento previo sobre el sistema permite inducir ciertas expectativas sobre su modo de operación que pueden ser medidas y cuantificadas en forma de variables finitas para obtener un cuadro general del comportamiento del sistema. El análisis de las discrepancias entre la conducta real del sistema y la conducta esperada activarán ciertas alarmas que sugieren la intervención sobre el sistema en sí o sobre otros bloques del proceso de gestión y monitorización.

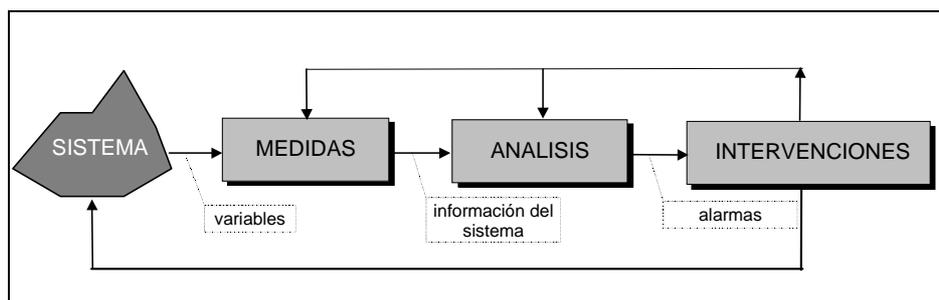


Figura 1-6: Proceso general de monitorización

1.6.2 Entorno de trabajo

En un entorno típico de monitorización y gestión de pacientes en clínica existen una serie de elementos importantes como pueden ser el paciente, la plantilla asistencial médica, y el equipo de monitorización. Esta situación, y las interrelaciones que tienen lugar, está esquematizada en la Figura 1-7.

En una UCI, los datos clínicos del paciente se obtiene a través de los síntomas, las observaciones clínicas, la historia clínica particular, la instrumentación conectada y las pruebas y análisis de laboratorio. En base a este volumen de datos, el clínico debe decidir qué acción terapéutica debe tomar: administración de medicación, intervención clínica o eléctrica y/o acciones manuales.

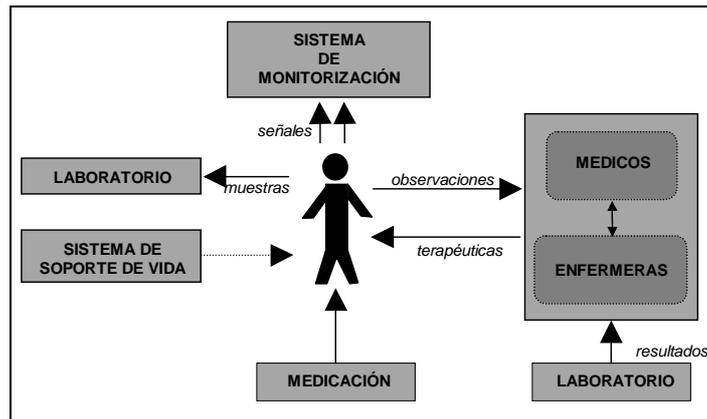


Figura 1-7: Elementos del entorno de la monitorización y gestión de pacientes

1.6.3 Monitorización Inteligente

Desde 1965 se hizo obvia la necesidad de introducir sistemas de medida y análisis automático para la monitorización de pacientes en UCI. La tendencia actual está orientada hacia el diseño de nuevas generaciones de sistemas y dispositivos que tengan una mayor autonomía y la posibilidad de interpretar más resultados. La aplicación de técnicas de IA a este campo ha llevado al desarrollo de este tipo de sistemas bajo una denominación común: *sistemas de monitorización inteligente*.

Los sistemas expertos constituyen frecuentemente soluciones elegantes en dominios bien estructurados y, hasta cierto punto, restringidos. Los sistemas de monitorización inteligente (SMI) amplían el horizonte de la IA, en concreto de los sistemas expertos, y pueden considerarse como herramientas capaces de interaccionar con diferentes fuentes de datos, adaptarse a los diferentes contextos del dominio y establecer una priorización de tareas, adaptándose a las restricciones temporales del entorno.

Formalmente, la construcción de un SMI pasa por el desarrollo de métodos y técnicas que posibiliten la medición y la estimación de los valores de un conjunto de parámetros, que faciliten el análisis y la interpretación de la información y que permitan establecer líneas de actuación apropiadas y sugerir directrices eficaces. Concretamente deberán tratar de [41]:

- Incrementar la seguridad de los sistemas previniendo errores y mejorar la calidad de las directrices sugeridas suministrando mejores procedimientos

de ayuda a la decisión. Con ello se pretende lograr que el personal especializado emplee su esfuerzo en la tarea de supervisión del proceso que se analiza y no en la supervisión de la instrumentación, muchas veces fuente de errores por exceso o defecto.

- Proporcionar herramientas eficaces para la ayuda a la decisión, de forma que el personal clínico vea al sistema como un colaborador, no un competidor.
- Incorporar entornos interactivos de análisis de información y presentación de resultados.
- Flexibilizar los sistemas de forma que sean fácilmente reconfigurables y adaptables a condiciones locales.
- Permitir su propio desarrollo incremental.
- Proporcionar buenos consejos en tiempo y hora.
- Integrarse de forma natural en los sistemas convencionales de manejo de la información, de manera que no modifiquen agresivamente las condiciones de trabajo del entorno.

En la instrumentación clásica de monitorización se dan una serie de características que los sistemas inteligentes pueden contribuir a mejorar:

- recogida, amplificación y filtrado de señales provenientes de la instrumentación
- procesamiento de señales.
- reconocimiento de eventos, fijando límites en los valores de las señales con el fin de activar alarmas si esos límites son sobrepasados.
- visualización (pantalla, papel) y almacenamiento.

Sin embargo, no se analiza la relación entre las variables medidas para establecer un estado fisiopatológico del paciente. Estas razones sugieren la conveniencia de introducir sistemas inteligentes en la rutina clínica.

1.6.4 Tareas de la monitorización

El dominio de los cuidados intensivos introduce aspectos diferenciales tanto con respecto a los sistemas expertos como a los sistemas de monitorización. En concreto, en el entorno de cuidados intensivos hay que distinguir tres fases bien definidas: inicialización, ejecución e interpretación [40]. En la Tabla 1-2 se muestran los diferentes

<i>Definición / Tarea</i>	<i>Inicialización</i>	<i>Ejecución</i>	<i>Interpretación</i>
<i>Descripción</i>	Seleccionar parámetros y terapia inicial, dependiendo del cuadro clínico del paciente	Examinar diferencias no permitidas entre parámetros que describen condiciones del paciente y sus valores normales	Evaluación de discrepancias y traducción en síntomas
<i>Objetivo</i>	Seleccionar terapia y diagnóstico	Observación de cambios fisiológicos	Análisis de discrepancias
<i>Conocimiento</i>	Protocolos	Protocolos Experiencia	Experiencia Modelo mental del estado fisiopatológico
<i>Entradas</i>	Observaciones clínicas Historia del paciente	Parámetros Observaciones clínicas Pruebas de laboratorio	Tendencias Discrepancias Observaciones clínicas Pruebas de laboratorio Historia del paciente
<i>Salidas</i>	Admisión Aproximación de monitorización y Terapia	Alarmas Discrepancias Tendencias	Cambios en la terapia Altas
<i>Usuarios</i>	Médicos	Enfermeras	Médicos y enfermeras
<i>Cuándo</i>	Comienzo	Continuamente después de la inicialización	De acuerdo a la terapia elegida y a la evolución del paciente
<i>Cómo</i>	Instrucciones escritas y verbales a las enfermeras	Observación de "displays", "reports" y alarmas	Análisis de "reports" y discusiones

Tabla 1-2. Tareas de monitorización en un entorno de cuidados críticos

aspectos de las distintas tareas de monitorización que involucran señales, signos, conocimiento, interpretación, toma de decisiones, comunicaciones y acciones. Es evidente que la complejidad de cada una de estas tareas es diferente dependiendo de la fase que estemos tratando. Así, mientras las fases de inicialización y ejecución requieren un seguimiento estricto de protocolos bien definidos (obtenidos a través de un adecuado entrenamiento del personal clínico), la interpretación requiere la generación de hipótesis a partir de la comprensión del sistema fisiológico que está siendo supervisado. Éste último punto conduce indefectiblemente al establecimiento de un modelo completo y

"correcto" del paciente. Blond [42] y Rasmussen [43] han sugerido que, como norma general, la interpretación es más usada en casos no rutinarios o en situaciones poco frecuentes en los cuales no hay reglas evidentes de comportamiento ni protocolos suficientemente establecidos. Esta situación se produce, evidentemente, por una falta de experiencias previas y, por consiguiente, los procesos de razonamiento deben dirigirse hacia conceptualizaciones de más alto nivel.

1.6.5 Niveles de tratamiento de datos

El proceso de monitorización y gestión de la información en un SMI se puede dividir en 4 niveles, como se muestra en la Figura 1-8 [40]:

- Nivel 1: Adquisición y procesamiento de señal, donde las estructuras hardware están seguidas de algún tipo de procesamiento basado en conocimiento.
- Nivel 2: Recibe características y estados de la señal y establece alarmas inteligentes fusionando la información de varias fuentes. También realiza algún tipo de análisis basado en conocimiento, como transformaciones número/símbolo.
- Nivel 3: Generación de respuesta en forma de terapia a partir de la existencia de un tipo de estado de alarma.
- Nivel 4: Integración de las respuestas de las diferentes capas en una descripción del estado fisiopatológico del paciente.

Cada capa puede desarrollarse independientemente ya que tiene su propia estructura y organización del conocimiento. Desde la última capa puede actuarse sobre las otras o sobre el paciente. En cualquier caso, es necesario que los cambios sean propagados.

El concepto de alarmas en monitorización ha sido ampliamente discutido. Si bien para que un mensaje de alarma sea efectivo, debe ser recibido y comprendido para que el personal clínico actúe en consecuencia, la realidad es que el médico no la considera como de gran ayuda en su labor, principalmente a causa del problema de las falsas alarmas. Otro problema adicional está relacionado con la definición de los umbrales de activación de la alarma, específicos para cada una de las señales fisiológicas

monitorizadas, y fuertemente dependiente de la calidad de la señal, con lo cual dichos umbrales se deterioran al mismo tiempo que las señales que vigilan.

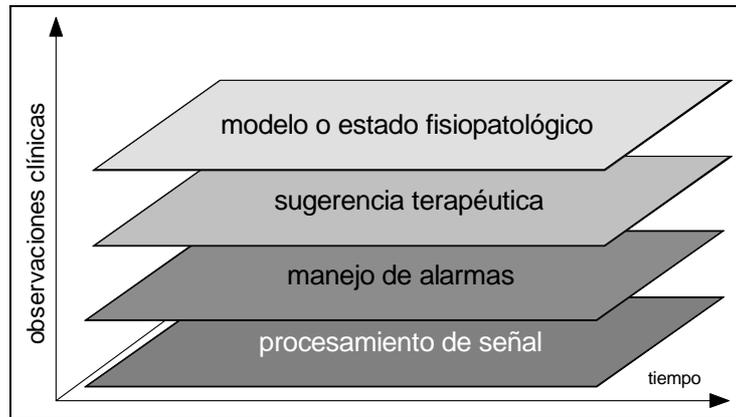


Figura 1-8: Niveles del proceso de monitorización y gestión

La Figura 1-9 muestra una aproximación a las alarmas inteligentes, desde el nivel numérico al nivel simbólico de tratamiento de la información [40]. El primer nivel concierne a la manipulación de señales y extracción a partir de ellas de la información que contienen. En un segundo nivel, el manejo de la información debe ser tal que debe permitir el reconocimiento de falsas alarmas ignorando datos erróneos, situaciones ambas inherentes a los procesos de medida y supervisión. Por ello se hace necesario incorporar técnicas de validación de las señales monitorizadas. Finalmente, los valores numéricos de los parámetros monitorizados tendrán que ser procesados simbólicamente. Ello implica su traducción a elementos semánticos con significado propio, ya sea cualitativo o cuantitativo, del dominio en cuestión. Todo este proceso deberá satisfacer las restricciones temporales que se apliquen al caso considerado.

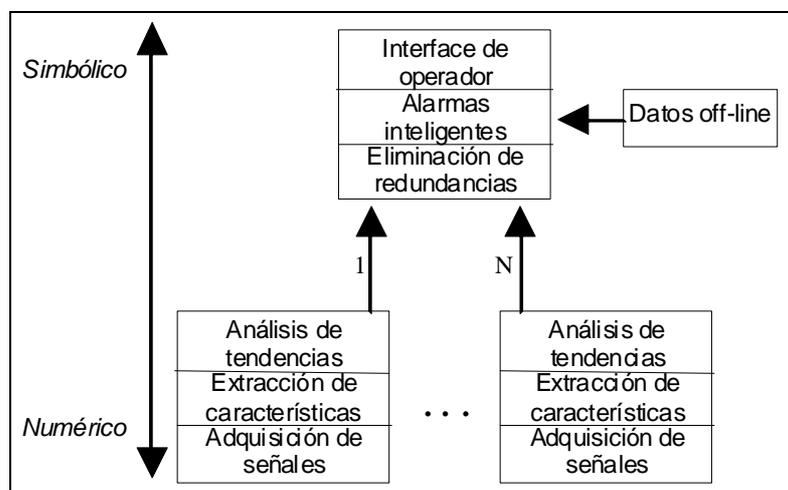


Figura 1-9: Aproximación general al problema de alarmas inteligentes

En resumen, la tarea de monitorización inteligente puede considerarse como un problema cíclico que involucra adquisición de información y datos, interpretación de la información en contextos específicos, establecimiento de diagnósticos según el estado fisiopatológico del enfermo y prescripción de terapias para corregir las situaciones indeseables y mejorar la condición del paciente [44]. Sin embargo, esta aproximación presenta una serie de problemas como la integración de información de diferentes fuentes (instrumentación, laboratorio, ...), la secuencia temporal de adquisición que casi nunca es idéntica, la interpretación contextualizada para el paciente que no se lleva a cabo de forma inferencial, etc.

1.6.6 Arquitectura básica de un sistema de monitorización inteligente

La arquitectura básica de un SMI debe contemplar todas las restricciones que vienen impuestas por el proceso en sí mismo y debe ser capaz de gestionar el comportamiento de sistemas físicos parecidos pero diferentes, como son los pacientes de una UCI.

El trasiego constante de información que tiene lugar durante un proceso inteligente de supervisión obliga a definir y diseñar arquitecturas potentes, que simplifiquen y optimicen la interacción del sistema inteligente con el mundo exterior. Esta interacción tiene lugar a dos niveles fundamentales: *interacción hombre/máquina*, e *interacción máquina/máquina* [28].

La interacción hombre/máquina está relacionada con la gestión de la información de entrada —definida como contextos de interpretación introducidos durante la fase de inicialización—, y con la gestión de la información de salida —realizada a través de los interfaces de visualización de resultados, que deben facilitar la presentación de interpretaciones suficientemente informativas y autoexplicativas—. Además, las interfaces hombre/máquina deberían ser diseñadas de manera que suministren la información estrictamente necesaria para seguir convenientemente el proceso de monitorización. En general, no suele ser práctico incluir ni demasiadas alarmas, ni demasiados datos en la pantalla. Un exceso de información puede producir el efecto contrario al deseado, es decir, ruido. Las últimas tendencias parecen demostrar que es preferible el empleo de información simbólica y/o gráfica, que el empleo de información exclusivamente numérica.

Por otra parte, la interacción máquina/máquina está íntimamente relacionada con la comunicación entre dispositivos y con la integración de módulos. Al respecto, la ingeniería del sistema debe tener en cuenta las siguientes restricciones:

- Siempre que sea posible se deben diseñar sistemas que permitan la transferencia en tiempo real de los mensajes de alarma, y de las señales -o valores puntuales de los parámetros- que han motivado la alarma correspondiente. Este proceso debe dirigirse desde las estaciones remotas (i.e., *a pie* del sistema físico), hasta la estación central.
- Los ajustes finos en los criterios de monitorización, supervisión, e interpretación, deberían poder ser programados desde la estación central.
- Siempre que sea posible, se deben incluir dispositivos de comunicación que sigan algún estándar.
- El sistema diseñado debe ser flexible y fácilmente configurable, y debe introducir cambios mínimos en la rutina de trabajo del usuario.
- Por último, se debe procurar que el sistema inteligente de supervisión pueda ser fácilmente integrable en el sistema de información utilizado hasta el momento.

Con estas consideraciones, la Figura 1-10 presenta esquemáticamente una arquitectura típica para un sistema inteligente de supervisión.

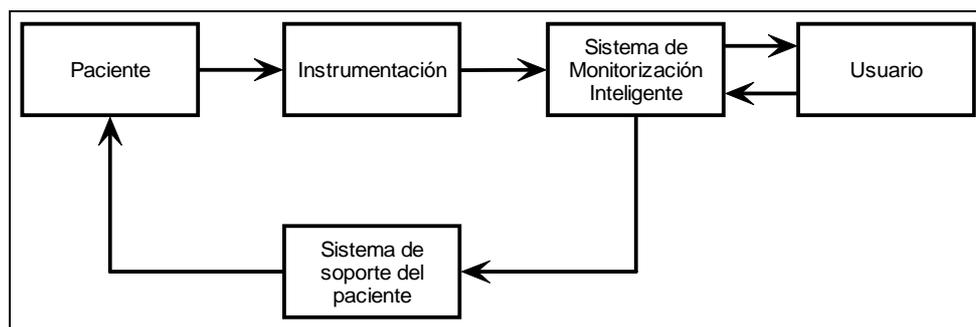


Figura 1-10: Una arquitectura típica que integra un sistema de monitorización inteligente

Otras características, como la necesidad de manipular información imprecisa, incierta o incompleta, la elección del paradigma de razonamiento empleado, la

representación del conocimiento, etc., forman parte de la ingeniería de conocimiento del módulo correspondiente.

1.6.7 Clasificación de SMI

Atendiendo a su arquitectura típica, los SMI se clasifican en [28]:

- Herramientas de monitorización
- Sistemas de supervisión de propósito específico
- Sistemas de supervisión de propósito general

Las herramientas de monitorización no son más que sistemas -o subsistemas- diseñados para resolver aspectos muy concretos y limitados de un proceso completo de supervisión inteligente. Aunque habitualmente se las considera como entidades aparte, de hecho deben considerarse como módulos constituyentes de sistemas más complejos, de propósito específico o de propósito general.

Por otra parte, los sistemas de supervisión de propósito específico se ocupan de problemas globales en dominios concretos. En su diseño -y por consiguiente en su arquitectura-, se hace especial hincapié en lograr una organización del conocimiento adecuada. Además, el conocimiento subyacente suele ser muy extenso y profundo. Este tipo de sistemas es el preferido por el experto no informático que, sin embargo, acepta los planteamientos de la inteligencia artificial como un medio adecuado para resolver, al menos en parte, sus problemas profesionales cotidianos. En la construcción de este tipo de sistemas de supervisión, el mayor reto es la ingeniería del conocimiento.

Por último, los sistemas de supervisión inteligente de propósito general demandan mayores esfuerzos a la hora de implementar arquitecturas genéricas. En tales sistemas el conocimiento del dominio es secundario; simplemente se cuenta con él para su posterior implementación. En este tipo de sistemas se trabaja más a nivel de la comunicación entre módulos, que al nivel del propio módulo. El reto fundamental es construir un sistema que sea capaz de manejar correctamente tareas de monitorización complejas y de incluir diversos métodos de inferencia y de razonamiento. Los sistemas de propósito general suelen ser más flexibles que los de propósito específico, pero también son menos potentes.

1.6.8 Problemas de desarrollo de SMI

Los principales problemas que nos encontramos en el desarrollo de sistemas basados en el conocimiento para el manejo de pacientes en unidades de cuidados intensivos son el diagnóstico del paciente, la configuración del proceso de monitorización y la terapia [40]. En la realización de estas tareas aparecen nuevos problemas como son la simultaneidad de eventos, la evaluación de información que evoluciona, el pronóstico, la respuesta del paciente al respecto de nuevas terapias, la combinación de terapias, contraindicaciones, la secuencia temporal de eventos y reapariciones y, por último, la aparición de complicaciones que pueden requerir actuaciones inmediatas. En este contexto, cualquier solución basada en la utilización eficaz y eficiente de conocimiento específico es apropiada ya que:

- todas estas tareas requieren conocimiento de alto nivel en distintos dominios, que van desde la comprensión de las señales biomédicas involucradas hasta la farmacología, pasando por las interpretaciones clínicas.
- el volumen de información numérica es extraordinariamente desproporcionada, por lo que son necesarias estructuras de conocimiento capaces de traducir números en elementos simbólicos con una semántica bien definida.
- frecuentemente se requieren respuestas en tiempos muy cortos ante situaciones inesperadas y en entornos agresivos. Por esta razón, la tendencia debe ser no aumentar la agresividad del entorno y producir respuestas temporalmente aceptables a través de interfaces interpretativas, dialogantes y amistosas.
- en todo proceso de toma de decisiones en general (y de cuidados intensivos en particular), la incertidumbre es un factor omnipresente cuyo origen puede estar en el propio conocimiento del dominio, en la incompletitud de la información numérica, en retardos temporales o, simplemente, en la ineficacia y/o inapropiabilidad de los equipos de medida y los sistemas de alarmas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, los esfuerzos en la realización de sistemas de monitorización inteligente para su utilización en unidades de cuidados intensivos debe dirigirse hacia la manipulación eficaz de las alarmas, la predicción de posibles cambios en la fisiopatología del paciente, el análisis de tendencias y evoluciones y el establecimiento de herramientas de ayuda a la decisión, cuyo ejemplo más avanzado son los sistemas expertos.

1.7 Resumen

Este capítulo introduce aspectos teóricos del área de Inteligencia Artificial y su aplicación a otras disciplinas como puede ser la Medicina. En concreto se exploran conceptos como dato, información y conocimiento, espacio de estados, búsqueda y representación del conocimiento, y se revisan los hechos más destacados y realizaciones prácticas más importantes a lo largo de su corta y reciente historia. Las técnicas de Inteligencia Artificial han encontrado aplicación en muchas áreas, en especial en el campo médico, donde los sistemas expertos ejercen funciones de ayuda a la decisión clínica. Con la creciente sofisticación de la instrumentación y la complejidad de las tareas de toma de decisión, la medicina intensiva ha adaptado los sistemas expertos y han surgido los sistemas de monitorización inteligente, que combinan la interpretación con la toma de decisión, y amplían las capacidades inteligentes hacia la interacción con diversas fuentes de datos, la adaptación a los distintos contextos del dominio de aplicación y las restricciones temporales del entorno de aplicación y la priorización de tareas.

1.8 Propósito y alcance de la presente tesis

En esta memoria se describe el análisis, diseño, e implementación de un sistema de monitorización inteligente de pacientes dependientes de ventilación mecánica en Unidades de Cuidados Intensivos. La aproximación propuesta contempla una arquitectura cliente-servidor [45] en la cual una estación local, con tareas explícitas de adquisición y preprocesado de datos, se conecta mediante una red de datos a una estación central, dedicada a tareas de gestión de comunicaciones y control de las estaciones locales, integración de datos e información simbólica de los pacientes, asesoramiento diagnóstico y terapéutico a través de un sistema experto y gestión de la base de datos del sistema global.

Esta arquitectura definida ha sido aplicada a PATRICIA [44], un sistema de monitorización conceptualmente dividido en tres módulos, el módulo determinístico, heurístico y de control. El primero, de naturaleza algorítmica, se situó en la estación local, localizada en la cabecera de cama del enfermo, y se ocupa de la adquisición de datos provenientes de la instrumentación biomédica conectada al paciente, y de su clasificación simbólica específica, comparando los datos clínicos con rangos individualizados. Los resultados de esta tarea de preprocesamiento simbólico son usados posteriormente en tareas inferenciales. El segundo módulo, incluido en la estación local, es un componente de naturaleza heurística, que se ocupa del establecimiento de diagnósticos globales a partir de la información semántica obtenida de la estación local correspondiente, y de la obtención de sugerencias terapéuticas de acuerdo con la condición fisiopatológica del paciente. El tercer módulo, el módulo de control, fue distribuido entre las estaciones. El módulo de control de la estación local se encarga de controlar la adquisición, procesado y transmisión de datos a la estación central, gestionar las comunicaciones y responder a los eventos que genere el sistema, entre ellos, posibles alarmas de monitorización. Por otra parte, el módulo de control de la estación central se ocupa de controlar el funcionamiento de las estaciones locales y la red de comunicaciones, priorizar las distintas tareas de monitorización, obtener resultados del sistema experto y gestionar la base de datos a donde llegan todos los datos de las estaciones locales.

La aproximación propuesta contribuye a mejorar la asistencia clínica del enfermo, liberando al personal de tareas de monitorización rutinarias, y asistiendo al clínico en la determinación de diagnósticos y prescripción de terapias a través del conocimiento heurístico implementado.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA CLÍNICO

“La toma de decisión es...algo que nos concierne a todos, tanto a los que toman la decisión como a los que sufren las consecuencias” (D. Lindley)

La solución de problemas en el entorno clínico es una tarea compleja. Los procesos subyacentes a este logro intelectual son incluso difíciles de entender. Cualquier intento para explicar los componentes del proceso de diagnóstico, elemento clave en la solución de problemas, debe derivarse principalmente de la reflexión por parte de los médicos más experimentados sobre sus propios métodos. El resultado de este proceso de introspección son los principios y esquemas generales, cuya aplicación es cualquier cosa menos directa a causa de que muchas situaciones se presentan con múltiples y diferentes aproximaciones. Esta imprecisión fomenta la creencia de que los procesos de solución de problemas de los médicos no pueden ser escudriñados. A causa del misterio que rodea el concepto de juicio clínico, el médico experimentado confía en la capacidad del estudiante para deducir a partir de la observación lo que él como profesional curtido practica, pero es incapaz de expresar [46].

2.1 El proceso de diagnóstico en Medicina

2.1.1 Introducción

La explicación del proceso que sigue un médico a la pregunta de cómo lleva a cabo un diagnóstico médico podría resumirse en los siguientes pasos [47]:

Primero, obtengo todos los hechos significativos del caso a partir de la historia del paciente, el examen físico y los análisis de laboratorio.

Segundo, evalúo la importancia relativa de los diferentes signos y síntomas. Algunos datos podrán ser de gran importancia y otros de menos.

Tercero, reviso todos los diagnósticos con los que el caso particular puede parecerse. Después, excluyo de la lista un diagnóstico tras de otro hasta que se hace evidente que el caso particular puede encajar en una categoría diagnóstico definitiva, o que puede ser uno de entre varios diagnósticos, o incluso que su naturaleza exacta no puede ser determinada.

Esto es una versión simplificada del proceso de diagnóstico. Los médicos frecuentemente comentan que cuando ven al paciente por primera vez tienen un “feeling”¹⁰ del caso. Este *feeling*, aunque difícil de explicar, es una suma de sus impresiones respecto a cómo los datos parecen encajar entre ellos, a la fiabilidad del paciente, a la apariencia general, a la expresión facial, y demás. Y estos pensamientos influyen en los diagnósticos considerados. Por ello, nadie podría dudar de los complejos procesos de razonamiento que tienen lugar a la hora de elaborar un diagnóstico, ni de la importancia de éste para elegir una terapia óptima, una decisión que ya por sí misma demanda adicionalmente otro tipo de procesos complejos de razonamiento.

La enseñanza metódica en los procesos de diagnóstico ha sido una tarea exclusiva de las facultades de medicina hasta hace poco tiempo. Entre las causas, difíciles de explicar, se pueden señalar las siguientes [48]:

1. La falta de información básica interdisciplinaria imperante en medicina, lo que hace difícil trabajar en otras áreas si no se recibe una enseñanza específica,
2. El concepto de diagnóstico como un "arte", que se aprende por experiencia y dedicación de muchos años,
3. La falta de conocimiento científico, hoy por hoy en permanente investigación.
4. La necesidad de metodologías diagnósticas, cuestión que es una consecuencia directa de los tres puntos anteriores.

La causa fundamental es que los clínicos experimentados son capaces de realizar diagnósticos casi insospechados para el profano, pero tienen dificultades para explicar detalladamente los pasos seguidos en el proceso de razonamiento, es decir, actúan de una forma pero la explican de otra: “los mejores clínicos no siempre son los mejores maestros”.

Jerome Kassirer, editor del *New England Journal of Medicine*, define el diagnóstico médico como un "proceso iterativo, inferencial, capaz de determinar mediante examen la naturaleza y circunstancias de una enfermedad" [49]. Esta sencilla

¹⁰ Sensación, sentimiento

definición —aunque tal vez difícil de comprender para muchos médicos— indica una explicación de dicho concepto en términos más cercanos a la lógica, informática o psicología cognoscitiva que a la idea de "arte" antes referida. La complejidad creciente de la práctica médica habitual, con la avalancha de información de muy diversos tipos que el médico recibe a múltiples niveles —así como otros condicionantes económicos, legales, laborales y científicos— obligan a una optimización de su trabajo, del que es parte fundamental el diagnóstico médico. La labor fundamental del médico es, por tanto, el razonamiento clínico: sospechar la causa de los síntomas y signos del paciente, reunir información relevante, escoger las pruebas diagnósticas adecuadas y recomendar un tratamiento.

2.1.2 La toma de decisión médica

La toma de decisión médica es la actividad por excelencia del profesional de la asistencia sanitaria. El clínico utiliza normalmente principios fisiológicos y razonamiento deductivo para elaborar sus diagnósticos sobre el paciente. Sin embargo, muchas decisiones tienen como base el conocimiento que ha ido adquiriendo a través de una experiencia colectiva [50].

Una adecuada toma de decisión necesita tres requisitos que son: datos fiables, conocimiento adecuado y métodos correctos para la solución de problemas. Es importante resaltar este último aspecto, ya que el clínico experimentado se basa principalmente en su experiencia mientras que el médico novel pronto se da cuenta de que el buen juicio clínico reside más en un adecuado razonamiento, que en un conocimiento exhaustivo del dominio específico, o en el acceso a datos precisos del paciente. Cualquier sistema computacional que intente emular dicho proceso de razonamiento debe satisfacer dichos requisitos. Como ejemplo, tómesese los sistemas expertos que acumulan el conocimiento del dominio clínico en la base de conocimientos y usan de técnicas de solución de problemas a través de los mecanismos de inferencia del sistema [51].

El proceso de toma de decisión médica paso a paso se divide en tres fases bien diferenciadas que constituyen lo que popularmente se conoce como “consulta”[17]:

1. Recolección de datos, que consiste en obtener la historia del paciente y datos de laboratorio y clínicos. Estos datos incluyen:
 - Síntomas, o sensaciones subjetivas contadas por el paciente,
 - Signos, que son objetivos y observables por los médicos; y
 - Resultados de laboratorio, que se consideran como descubrimientos, hallazgos o “*findings*”.
2. Diagnóstico, o proceso que usa de los datos anteriores para tratar de determinar la enfermedad.
3. Recomendaciones terapéuticas.

Estas tres fases no son independientes; a la inicial etapa de recolección secuencial de datos, le sigue la interpretación de datos y la generación de hipótesis sobre la enfermedad para dirigir la posterior recolección de información. Los nuevos datos acumulados en cada etapa se añaden al conjunto de observaciones y se usan para reformular o refinar las hipótesis activas. Este proceso se repite hasta que una hipótesis alcanza un nivel umbral de certidumbre (bien porque ha sido probada o bien porque la incertidumbre se ha reducido hasta un nivel satisfactorio). En este punto puede llevarse a cabo la decisión terapéutica y, por regla general, requiere más recopilación de la información. Todo este proceso recibe el nombre de aproximación hipotético-deductiva [46] y se muestra en la Figura 2-1.

La característica más sobresaliente de esta aproximación es que el proceso de recolección de datos, diagnóstico y tratamiento dirigido por hipótesis está basado en conocimiento, porque depende no sólo de una base de hechos significativos que permite la interpretación adecuada de los datos, la selección de preguntas y las pruebas de seguimiento de la enfermedad, sino también del uso efectivo de técnicas heurísticas que caracterizan la pericia individual [52]. La mayor parte de los médicos realizan estos procesos sin una metodología claramente definida. Por ello, en una historia clínica estos aspectos están implícitos pero no detallados expresamente, por lo que cualquier médico ajeno al estudio deberá adivinar cuáles han sido los procesos de razonamiento que el autor de la historia ha realizado [48].

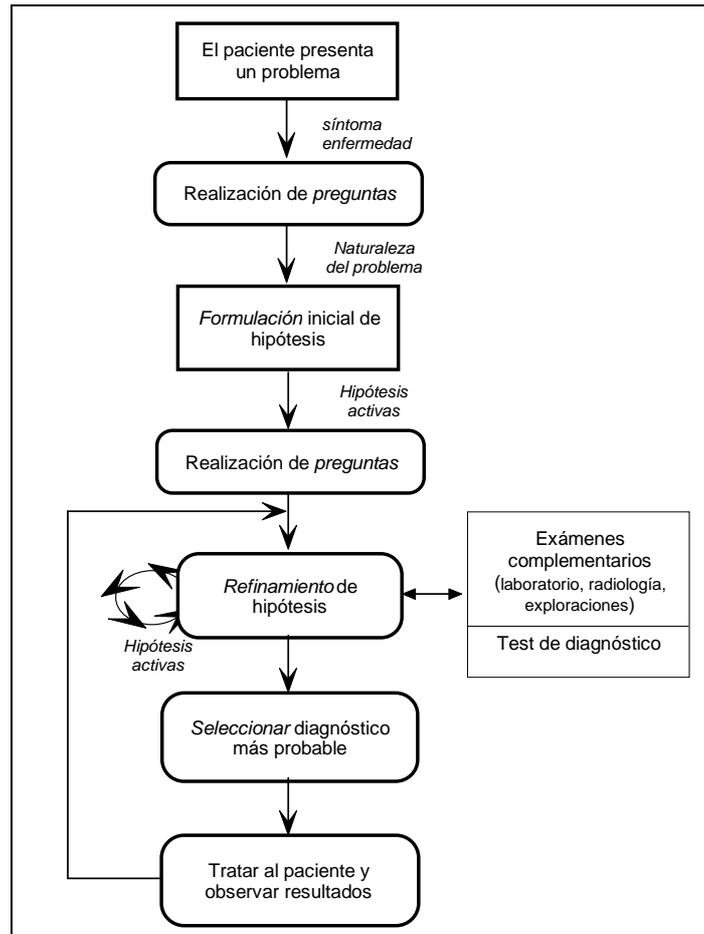


Figura 2-1: Visión esquemática de la aproximación hipotético-deductiva

Casuística

Se puede considerar que un dato médico es cualquier observación sobre un paciente —como puede ser una lectura de temperatura corporal, la cantidad de glóbulos rojos en sangre, una historia pasada de rubeola, o un valor de presión sanguínea—. Generalmente está definido por 4 elementos: (a) el paciente en cuestión, (b) el parámetro que está siendo observado, (c) el valor del parámetro, y (d) el tiempo de observación. Éste último aspecto es muy importante porque puede afectar a la evaluación y a la interpretación de los datos [52].

Uno de los problemas fundamentales en el entorno clínico es la *sobrecarga de datos*, que provoca que el médico sea incapaz de procesar y sintetizar de forma inteligente y rápida la información que está recibiendo. De hecho, las unidades de cuidados intensivos y las salas de operaciones son escenarios clásicos de este problema donde los pacientes son monitorizados exhaustivamente, se obtienen numerosos datos y

las decisiones tiene que ser tomadas rápidamente. Igualmente importante es la calidad de los datos recogidos, que deben ser validados previamente a ser aceptados [51].

Una recogida de datos completa es fundamental para una adecuada toma de decisión, como se mencionaba anteriormente. Pero es necesario conocer la naturaleza del dato, es decir, si es de tipo narrativo, numérico, señal o imagen, porque tendrán diferentes procesos de tratamiento posterior. Entre los datos de tipo *narrativo* hay citar todas las anotaciones que recoge el clínico en la ficha del paciente, como identificación, antecedentes de patologías propias y de la familia directa al enfermo, factores de riesgo, reseña de los distintos sistemas y/o funciones corporales, indicaciones del enfermo acerca de la sintomatología que padece y las observaciones visuales del médico así como hipótesis de posibles diagnósticos que encajan en el caso particular. Por otra parte, los datos de tipo *numérico* están representados por las pruebas de laboratorio, medidas de signos vitales (e.g., temperatura, tensión sanguínea) procedentes tanto de la instrumentación biomédica conectada al enfermo como de dispositivos manuales y ciertas medidas tomadas durante el examen físico del paciente (e.g. peso corporal). Los datos de naturaleza analógica, que aparecen en forma de *señal*, son particularmente interesantes para el diagnóstico de enfermedades cardíacas y neurológicas donde la interpretación de los datos depende no sólo de los valores de estas ondas, sino también de la forma que adopten. Por último, los datos en forma de *imagen* forman una categoría altamente dependiente de la tecnología para su captura. Ejemplos característicos son las Resonancias Magnéticas Nucleares (RMN), las ecografías y las imágenes de las cámaras de las sondas endoscópicas frente a otros más clásicos como las imágenes radiográficas o el mismo diagrama dibujado por el médico que representa las disfunciones o anomalías que ha observado [52].

Diagnóstico

La Figura 2-2 ilustra el proceso dinámico de una enfermedad respecto a su progreso. Se llama *etiología* a las causas originales de la enfermedad, mientras que la *patogénesis* es la forma en que la enfermedad se desarrolla a partir de las causas referidas. Idealmente, una diagnosis implica determinar la etiología, con lo cual se puede formular un tratamiento para la identificación de las enfermedades y sus causas. Sin embargo, con frecuencia el conocimiento médico es incompleto y esto no es posible.

En estos casos, los tratamientos deben basarse en asociaciones empíricas de características de la enfermedad.

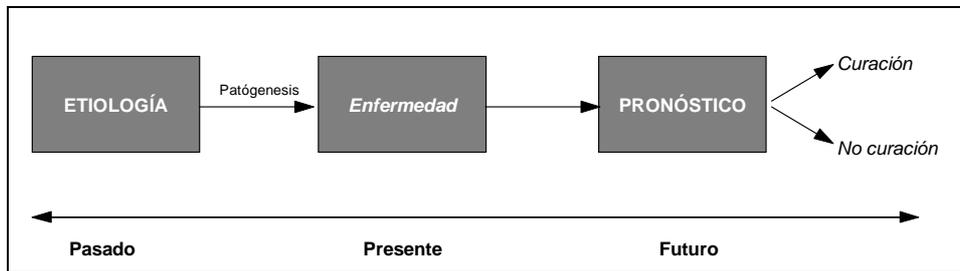


Figura 2-2. Proceso de una enfermedad

Recomendaciones terapéuticas

El punto final del proceso de toma de decisión médica está representado por la terapéutica. Si bien en la mayoría de los casos se prescribe cuando ya hay un diagnóstico final, en ciertos casos, sin embargo, tal tratamiento puede prescribirse sin haberse efectuado un diagnóstico, con lo cual se habla entonces de un "tratamiento sintomático". Esta situación puede producirse bien porque el diagnóstico no ha podido establecerse, o en ciertas circunstancias particulares como casos de urgencia, en los cuales no es posible esperar la llegada de más datos antes de actuar.

2.2 Las Unidades de Cuidados Intensivos

2.2.1 Generalidades

Las Unidades de Cuidados Intensivos, UCI, fueron creadas a comienzos de los 50 para satisfacer las crecientes demandas de asistencia continuada sobre pacientes con desórdenes complejos, aunque fue entre los años 60 y 70 cuando experimentaron un mayor auge. Atrás quedan los trabajos precursores de Santaró y Galileo en 1625 para medir el pulso y la temperatura corporal, el esfigmomanómetro de Scipione en 1896 para medir la presión arterial, el galvanómetro de Einthoven para medir la ECG en 1903 o los primeros transductores desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial. Hoy en día las cifras señalan que las camas de cuidados críticos crecen un 5-6% cada año, con un coste de 4 veces el de una cama normal, suponiendo en total un 15-20% del gasto hospitalario [53].

Existen al menos cuatro categorías de pacientes que necesitan monitorización y que conforman cuatro tipos de UCI [54]:

1. Pacientes con sistemas de regulación fisiológica inestables, por ejemplo, pacientes postoperatorios con ausencia de control respiratorio.
2. Pacientes en condiciones críticas, es decir, en los que peligra su vida, por ejemplo, enfermos con infarto de miocardio.
3. Pacientes con estatus de alto riesgo, por ejemplo, recién operados de corazón o niños prematuros sin un desarrollo completo de pulmones y corazón.
4. Pacientes en estado fisiológico crítico, por ejemplo, aquellos con múltiples tipos de traumas.

La característica común de estas unidades es que el paciente, dependiendo de su estado, se conecta a complejos equipos de monitorización fisiológica y de soporte de vida y se somete a una amplia variedad de pruebas de laboratorio. Esta observación continua y repetida de las funciones fisiológicas tiene como fin obtener de forma eficiente un diagnóstico que guíe la selección de una terapia adecuada. Como consecuencia, dos son las implicaciones fundamentales que este proceso conlleva para el personal clínico: el tiempo y la sobrecarga de datos.

El tiempo es un aspecto muy importante en el entorno de medicina intensiva. La monitorización precisa de respuestas temporales adecuadas ante cualquier contratiempo que pueda surgir durante la estancia del paciente en la unidad. La incorporación de las alarmas a los sistemas supone el primer paso hacia una monitorización más segura para el paciente de forma que el clínico pueda anticipar acciones terapéuticas ante cualquier alteración de la estabilidad del estado del enfermo.

Por otra parte, la complejidad de los equipos de monitorización actuales hace que más y más variables puedan ser medidas y controladas con lo cual la tarea de “digestión” por parte del médico intensivista se hace más difícil. Lo más probable es que no retenga toda la información disponible y que ante tal cantidad de datos, unos enmascaren a otros en el proceso de interpretación. Si a esto se añade la posibilidad de que ciertas alarmas sobre estas variables sean activadas, es posible comprender la sobrecarga de datos que tiene que soportar el personal intensivista y que distraen su atención.

Así pues, la gran cantidad de datos que deben ser almacenados, procesados y considerados por un médico para elaborar un diagnóstico y un tratamiento y la documentación de la propia decisión médica, hacen que la labor de la enfermera sea en gran medida la de organizador, indexador y recopilador de documentos, lo cual la aparta de la verdadera labor que debe desarrollar.

En resumen, el tremendo crecimiento de la información médica, la demanda de cuidados que consigan el efecto deseado minimizando los costes, y la necesidad de documentar la decisión clínica ha contribuido a aumentar las demandas sobre el personal de asistencia clínica más allá del cuidado exclusivo del paciente [55]. Es necesario encontrar mecanismos de apoyo a la toma de decisión que ejecuten tareas rutinarias de supervisión y gestión de pacientes y que permitan al médico concentrarse en su trabajo.

2.2.2 Supervisión de pacientes: Fases

En un proceso completo de supervisión inteligente de pacientes se pueden distinguir tres fases diferenciadas: (a) inicialización, (b) ejecución y (c) interpretación, que aparecen referenciadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En cada una de ellas los procedimientos, los métodos, y los objetivos concretos son diferentes, aunque el objetivo global buscado siga siendo el mismo.

2.2.2.1 *Inicialización*

La fase de inicialización es de marcado carácter protocolario. En ella se efectúa una selección previa de los parámetros relevantes para la caracterización y seguimiento del paciente, y se establece un plan genérico de actuación tendente al mantenimiento en condiciones de normalidad. La selección se lleva a cabo de acuerdo con la descripción y características del paciente monitorizado. El objetivo fundamental de esta fase es el establecimiento de un plan concreto de supervisión y control basado en un conjunto concreto de protocolos bien elaborados y comúnmente aceptados por la práctica clínica. La selección de uno u otro protocolo se efectúa considerando los valores de las variables consideradas relevantes para ese paciente y su propia historia clínica. Como puede observarse, el conocimiento requerido en esta fase es de alto nivel, aunque protocolario.

2.2.2.2 Ejecución

En esta fase comienza el proceso de supervisión propiamente dicho, y para ello se compara continua y cíclicamente los valores de los parámetros que hacen referencia a las condiciones del paciente con los valores de referencia considerados (i.e. los valores de normalidad), con el objeto de detectar cambios fisiológicos inesperados en el paciente y reflejados en diferencias marcadas entre ambos valores. De esta forma, el usuario involucrado en esta tarea es típicamente la enfermera cuya misión consiste en recopilar la información de los parámetros, las observaciones clínicas y los resultados de laboratorio, prestando especial atención a la observación visual de la instrumentación biomédica y a las alarmas definidas.

Durante esta fase, las salidas del sistema pueden ser de varios tipos: situaciones de normalidad, situaciones de alarma y tendencias, estableciéndose un tratamiento diferente para cada una de ellas. Así, si durante un ciclo completo de ejecución se identifica una situación de normalidad, la respuesta del sistema de supervisión debería ser simplemente la configuración y ejecución de un nuevo ciclo. Por otra parte, si la situación identificada es una situación de alarma, el suceso debe ser inmediatamente interpretado, y en la medida de lo posible, corregido. Finalmente, si la situación es una tendencia anormal, que no llega a ser una situación de alarma, la respuesta del sistema será diferente y requerirá un tratamiento más complejo encaminado a corregir esa tendencia y evitar la condición de alarma.

2.2.2.3 Interpretación de información y datos en UCI

Las acciones relevantes que se llevan a cabo en esta etapa son acciones que permanecen latentes hasta que son invocadas, bien porque se ha detectado alguna discrepancia importante entre el comportamiento real del paciente y el comportamiento predicho, o bien porque el protocolo de inicialización incluía interpretaciones periódicas. En esta fase, por tanto, las diferencias encontradas durante la monitorización se evalúan y se traducen en síntomas.

Típicamente, el conocimiento requerido en esta fase es de marcada naturaleza heurística, esto es, conocimiento derivado de la experiencia pasada del médico y modelos mentales del estado fisiopatológico del paciente. Dicho conocimiento se aplica

para efectuar correcciones sobre el plan inicialmente tratado o para dar respuestas rápidas a eventos inesperados y/o de suma gravedad.

Durante esta fase, las salidas del sistema son de dos tipos, bien desarrollo de terapias o bien, en su caso, proceder a dar el alta al enfermo. Para ello, el médico y la enfermera evalúan toda la información que se tiene sobre el paciente, esto es, tendencias, discrepancias, observaciones clínicas, resultados de laboratorio e historia del paciente y elaboran un modelo del estado del paciente. De nuevo, se puede ver la complejidad de la tarea tan solo considerando la enorme cantidad de información que es necesario integrar y correlacionar.

Además, pueden aparecer una serie de circunstancias que dificultan considerablemente el proceso. Entre dichas circunstancias se pueden citar la simultaneidad de eventos, la evaluación de información que evoluciona temporalmente, la anticipación a eventuales situaciones de alarma, la secuencialidad de eventos diferentes sin relación de causa entre ellos y la imposibilidad de correlacionar temporalmente eventos entre los que si hay relaciones causales.

En resumen, se puede comprobar que la tarea de monitorización involucra gran cantidad de objetos que es necesario medir y componentes que es preciso coordinar. Por ello, aparece como una tarea adecuada para el desarrollo de herramientas de ayuda, que ejecuten tareas rutinarias de supervisión mientras permiten al médico y al resto de personal clínico dedicar mayor tiempo al cuidado del paciente sin disminuir por ello el nivel de seguridad exigible.

2.3 Informatización en las Unidades de Cuidados Intensivos

Paralelamente a la evolución de las UCIs, ha existido un rápido desarrollo de la tecnología de computadoras trayendo consigo su progresiva introducción e incorporación en las áreas médicas, convirtiéndose hoy en día en una herramienta indispensable. A ello ha contribuido el progresivo aumento de complejidad de la medicina intensiva y el decremento del coste tecnológico de los ordenadores. Ante una razón económica de peso, y teniendo en consideración la enorme sobrecarga de información que debe soportar el personal clínico, como ya se ha apuntado, parece

lógico pensar que las unidades de cuidados intensivos aprovechen las ventajas de un soporte informático.

Si bien en sus inicios los ordenadores eran simplemente usados para adquirir datos fisiológicos (e.g. la presión sanguínea), las realizaciones actuales se constituyen como herramientas de ayuda a la decisión clínica integrándose de pleno en las redes hospitalarias de comunicación de datos. Además, sus prestaciones incluyen la adquisición, almacenamiento, comunicación, integración de datos de diferentes fuentes, la capacidad de cálculo computacional y la generación de informes.

El ordenador no va a solucionar todos los problemas en una UCI moderna, sin embargo puede convertirse en una ayuda útil en la gestión de pacientes y en la integración, evaluación y simplificación en la gestión de datos, mientras al mismo tiempo facilita que el clínico pueda dedicar más tiempo al cuidado y asistencia personal del paciente.

2.3.1 Objetivos: soporte monitorización

Habiendo explorado ya anteriormente la naturaleza de la información médica y la posibilidad de modelizar los procesos de razonamiento a través de un sistema computacional, se puede afirmar que varias son las áreas de implantación del ordenador en las Unidades de Cuidados Intensivos [55]:

1. Asistir en las tareas de adquisición, almacenamiento y recuperación de datos del paciente procedentes de la instrumentación biomédica
2. Proporcionar capacidades de comunicación e integración de datos provenientes de diferentes fuentes, como pueden ser análisis de laboratorio, datos demográficos, variables fisiológicas, etc.
3. Almacenar e indexar todo de tipo de información relativa al paciente.
4. Generar todo tipo de informes en un formato amigable al usuario a partir de los datos almacenados independientemente del origen de éstos o del lugar físico donde se encuentren almacenados.
5. Servir de ayuda en la toma de decisión médica, efectuando tareas de interpretación, análisis y predicción, tomando el papel de consejero del clínico, y sirviendo como una herramienta de apoyo.

Esta última característica implica la necesidad de incorporar al sistema alguna forma de "inteligencia", y he aquí donde las técnicas de Inteligencia Artificial encuentran un campo de actuación.

2.3.2 Monitorización convencional vs inteligente

La tecnología de sistemas basados en conocimiento puede representar y organizar apropiadamente el conocimiento teórico y, sobre todo práctico, de los especialistas con experiencia, y ayudar a superar el problema de la sobrecarga de información con la adquisición continua de datos, la validación de estos datos y la planificación de terapias. Los sistemas de este tipo deberían permitir la interacción tanto de los clínicos más experimentados como los menos en tareas complejas de toma de decisión, para manejar y analizar los datos obtenidos directamente del sistema de monitorización del paciente.

- **Aportaciones Convencionales**

La aportación de los sistemas de monitorización desarrollados hasta hace poco era doble [81]. Por una lado proporcionar un entorno para la adquisición y almacenamiento de grandes volúmenes de datos, y la presentación "amigable" de resultados; y por otro interpretar esos mismos datos a través de un sistema experto.

Sin embargo, aunque básicamente correctas, ambas aproximaciones no cuentan con mecanismos de adaptación al contexto, es decir, de interpretación de datos clínicos a la luz del paciente específico, con lo cual el establecimiento de diagnósticos posterior no obtendría resultados correctos.

- **Aportaciones Inteligentes**

Considerando lo anteriormente dicho, los sistemas de monitorización inteligente amplían el alcance en la aplicabilidad de los sistemas expertos, y deben ser considerados programas inteligentes capaces de realizar las siguientes tareas [44]: (a) interactuar con instrumentos y diferentes fuentes de datos de una forma no secuencial, realizando tareas de adquisición y almacenamiento; (b) adaptarse a los diferentes contextos encontrados en el dominio del problema, es decir, en la UCI, interpretando los datos según el paciente considerado; (c) reconocer los datos erróneos y la información inconsistente identificando artefactos de la instrumentación a la cual está conectado el paciente; y (d) priorizar las diferentes tareas de monitorización para adaptarlas a las restricciones

temporales que impone un entorno UCI y a las necesidades particulares de cada paciente.

A tenor de lo dicho, la monitorización inteligente de pacientes en UCI's plantea una serie de problemas que es necesario abordar.

En primer lugar el establecimiento de límites entre los cuales se mueven los valores de normalidad de las variables fisiológicas del paciente. Dichos rangos están determinados por un contexto dentro del cual deben ser definidos. De esta forma, la interpretación posterior de los datos tiene lugar considerando el caso clínico particular y del mismo modo, la definición de alarmas. La elección incorrecta de estos límites provocaría, por una parte un análisis erróneo de los datos fisiológicos, y por otro lado, la posible activación de falsas alarmas.

Un segundo problema concierne a la interconexión de equipos de monitorización y de soporte de vida con las computadoras y la red de información hospitalaria, si existe. Esta integración debe dar respuesta a requisitos básicos como los siguientes:

- transmisión de datos en tiempo real entre estaciones centrales y remotas de señales eléctricas y mensajes de alarmas;
- capacidad de ajuste de los parámetros de funcionamiento de dispositivos remotos desde la estación central;
- flexibilidad de configuración, de comunicación entre dispositivos de diferentes proveedores y una capacidad de expandibilidad y crecimiento, no sólo de monitores sino de equipos informáticos;
- permitir el almacenamiento de todo tipo de datos de laboratorio e información médica en general; y
- ser inmune, es decir, robusto frente a influencias del entorno.

Desgraciadamente, la investigación centrada en el desarrollo de redes de área local específicas para entornos de cuidados intensivos no se ha traducido en un estándar a seguir. Tan sólo la propuesta de la familia de estándares de interconexión de dispositivos médicos y ordenadores, Medical Information Bus (MIB P1073)[56], es el único desarrollo teórico con vistas de futuro, pero no cuenta con el apoyo de las casas comerciales de equipos de monitorización médica. En la figura Figura 2-3 puede verse

un ejemplo gráfico del estándar. En las aplicaciones actuales, o bien se utilizan dispositivos interfaz proporcionados por el suministrador para el equipo determinado, o bien se implementan aplicaciones software que a través del puerto RS-232-C que faciliten las labores de comunicaciones entre el monitor y el ordenador. Sin embargo, a los ya consabidos problemas de convenciones sobre asignaciones de patillas de conectores, control del flujo de datos y flujo en si, y formato de datos, se une el problema de desconocimiento del protocolo de comunicaciones del monitor ya que normalmente no se suministra con el equipo, y a veces, ni siquiera está disponible para el usuario. Últimamente, el desarrollo del estándar de intercambio de datos HL7 [57] intenta cubrir el vacío existente. HL7 especifica la implementación de interfaces entre dos aplicaciones software (emisor y receptor) de marcas diferentes o entre dos fuentes de intercambio electrónico de datos en el entorno de la asistencia sanitaria.

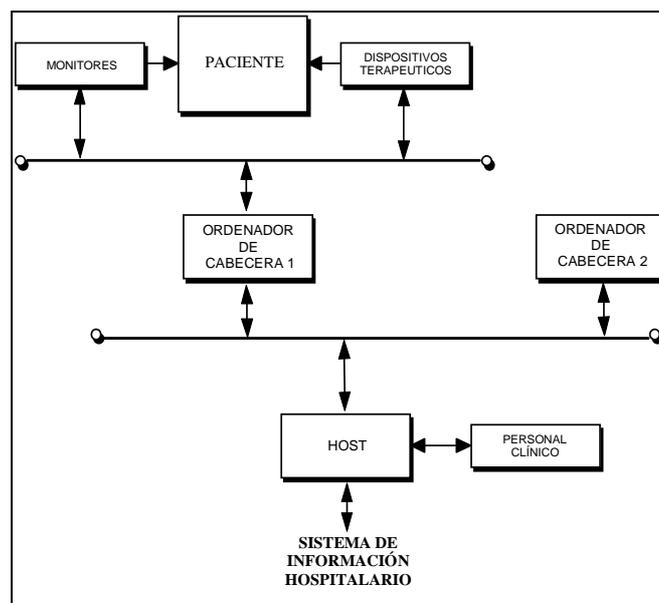


Figura 2-3: MIB IEEE Standard 1073 para manejo de problemas de comunicación de datos dentro de entornos de cuidados críticos.

Como tercer y último problema asociado a la monitorización inteligente, aparece la llegada no secuencial de información procedente de diversas fuentes: monitores, pruebas de laboratorio, pruebas complementarias, respuestas a terapias anteriores, conclusiones diagnósticas y recomendaciones terapéuticas del sistema experto, etc. que es necesario coordinar, resumir y presentar de forma clara y explícita, adecuada al nivel de cualificación del operador del terminal. Por tanto, es necesario definir diferentes niveles de explicación y de presentación de información [40].

La clave del éxito de cualquier sistema de monitorización inteligente reside en la *calidad* del conocimiento que contiene, lo cual lleva a la comprensión del entorno y a desarrollar estrategias para adquirir y representar el conocimiento. El análisis del problema decidirá la arquitectura del sistema experto y la representación del conocimiento correcta.

2.3.3 Configuración ideal

La configuración ideal de una UCI típica presupone la existencia de un monitor central o controlador al cual se conectan terminales de cabecera de paciente desde los cuales se efectúa la recogida de datos vía monitores de paciente o se controla el funcionamiento de dispositivos de soporte vital, como puede ser un ventilador mecánico. Desde este monitor central, la enfermera encargada de la unidad es capaz de visualizar en cada momento el estado de cada uno de los enfermos y podría ajustar cualquier parámetro de funcionamiento de cualquiera de los terminales, equipos o ventiladores. Dicho ajuste, siguiendo una terapia autorizada por el clínico a la vista de la situación médica, podría ser también sugerido por el sistema inteligente. Es por ello que la visualización de información pertinente juega un papel muy importante. La Figura 2-4 representa un esquema de conexiones de una UCI ideal.

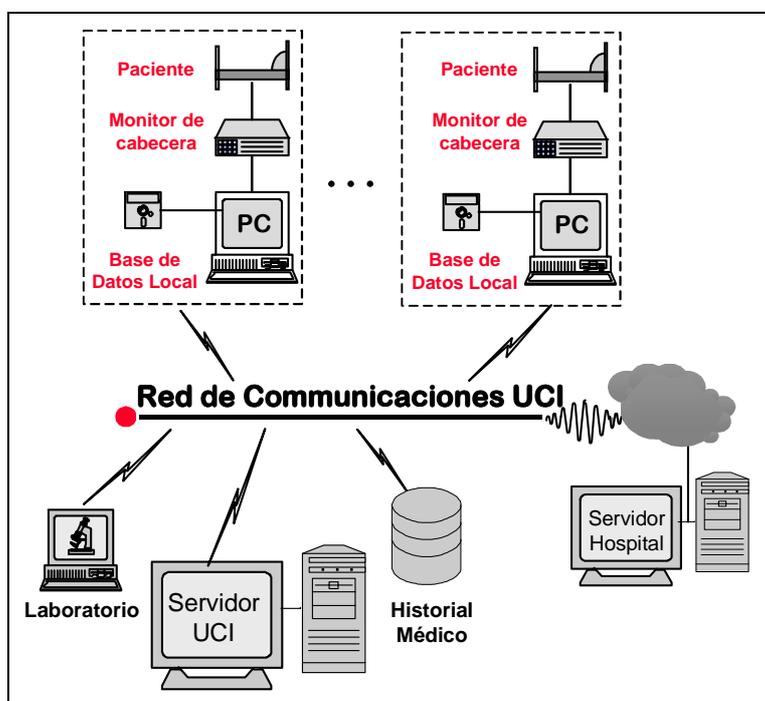


Figura 2-4: Configuración informática ideal en Unidad de Cuidados Intensivos

Otras facilidades de la estación central consisten en que el clínico podría modificar el intervalo de monitorización de un paciente y los rangos de aceptabilidad de las variables que definen el estado de un paciente, modificando de este modo la fase interpretativa del proceso de monitorización. Por ello el sistema debe reservar tan solo al médico responsable la capacidad de alterar cualquiera de estas variables, puesto que un dato podría variar su significado dependiendo del contexto en el cual el sistema lo interpreta.

2.3.4 Panorama actual

Dos son los principales problemas que han ocasionado que la implantación del ordenador en el área de cuidados críticos no haya sido generalizada: la ausencia de estándares aceptados y la falta de aceptación del usuario. Ambos problemas, tienen responsables diferentes, porque mientras el primero tiene como principal valedor al ingeniero electrónico, diseñador del dispositivo, el segundo recae en el ingeniero informático, responsable de la construcción del sistema informático. Como resultado, la computerización en el área de cuidados críticos puede reflejarse en la Figura 2-5, donde existen una serie de islas de instrumentación-computación, como son los monitores de cabecera conectados a equipos informáticos, cuya única misión es recoger y visualizar datos fisiológicos del paciente. Los dispositivos de bioinstrumentación operan con diferentes entornos de visualización de datos y tienen protocolos de comunicaciones distintos, lo cual incrementa el rechazo del usuario. Además, esta configuración no permite la integración de datos de otras fuentes ni aporta capacidades inteligentes de diagnóstico. Como resultado, la unidad se encuentra “aislada” del resto de unidades hospitalarias con lo cual la información tiene que ser copiada en otros soportes para ser compartida [45].

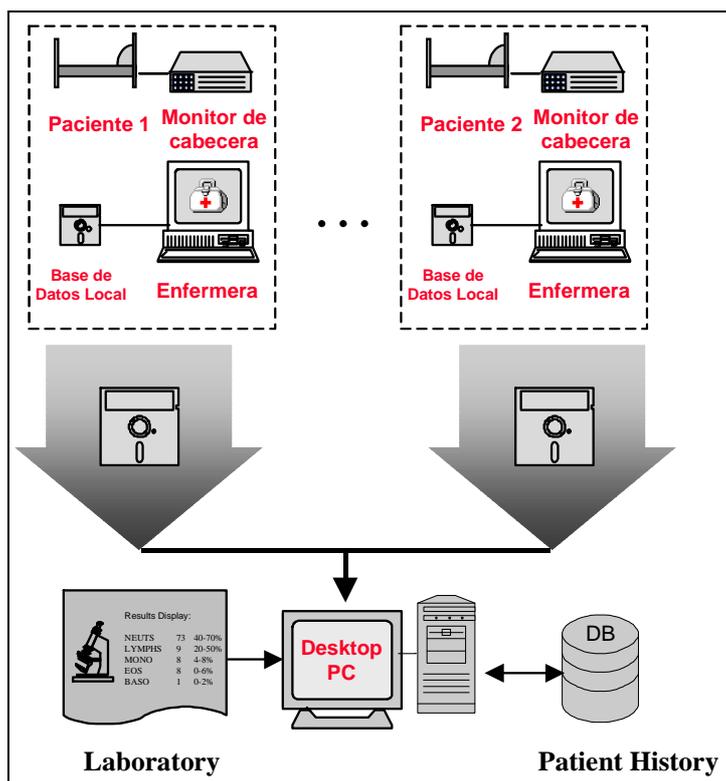


Figura 2-5: Configuración informática real en una Unidad de Cuidados Intensivos

A pesar de los beneficios obvios que se podrían obtener con una informatización que resuelva problemas como los descritos, la realidad es que una parte muy pequeña del entorno hospitalario tiene informatizadas todas sus unidades. Un estudio reciente revelaba que de 360 hospitales estadounidenses con unidades de cuidados intensivos, solo el 9% tenía informatizadas todas sus áreas, pero ni uno solo había integrado todas sus unidades en una red hospitalaria propia [58]. Realmente, queda mucho trabajo por desarrollar.

2.3.5 Análisis crítico

Un sistema de soporte a la decisión médica podría actuar de forma paralela a como lo hace el médico, estableciéndose un diálogo entre ambos para llegar a una conclusión y a una actuación que siempre debe ser decidida por el médico. De aquí que estos sistemas sean de ayuda a la decisión, nunca de toma de decisiones.

2.3.5.1 Motivos de desarrollo

La motivación para el desarrollo de sistemas de aplicación en medicina es doble. En primer lugar, hay obvios beneficios para la sociedad al proporcionar servicios de diagnóstico fiables y completos a un coste reducido. La mayoría de los errores que cometen los clínicos son por omisión, al no considerar todas las posibilidades cuando tratan de identificar una enfermedad. Una computadora, suponiendo que se utilizan los datos adecuados de un paciente y dependiendo de la estrategia de razonamiento inferencial, puede considerar exhaustivamente todas las posibilidades en su dominio. Además de ciertas tareas que los ordenadores pueden ejecutar más rápidamente que los clínicos, también hay tareas rutinarias que pueden asumir sin mayores problemas.

El segundo motivo para el desarrollo de estos sistemas es aprovechar sus capacidades para realizar los procesos cognoscitivos como la diagnosis, que implica:

- Taxonomía médica altamente desarrollada,
- Una gran base de conocimientos bien organizada,
- Expertos humanos en el dominio.

El proceso de diagnóstico clínico puede, por tanto, calificarse como una operación intelectual muy compleja. En este proceso, el modo de razonar del médico consiste básicamente en comparar lo que ve, que son los hechos, con lo que sabe, es decir, sus conocimientos y seleccionar de entre las muchas alternativas de estrategias aquella o aquellas más adecuadas para aclarar el problema. Así, esta base de conocimientos del médico está configurada por patrones de enfermedad, en los que se memorizan perfiles clínicos (síntomas y signos) que caracterizan la historia natural de las enfermedades. Sin embargo, el gran número de hechos interrelacionados que un médico debe adquirir y usar así como las condiciones de incertidumbre en las que se desenvuelven los procesos de toma de decisión médica, son una carga complicada para la mayoría de las mentes humanas. Es por ello que un sistema de soporte a la decisión médica puede contribuir de manera notoria a facilitar la tarea del clínico a la hora de interpretar los datos y decidir los diagnósticos en dominios pequeños, concretos, y suficientemente estructurados y comprendidos.

2.3.5.2 Criterios de desarrollo

Adecuación del problema

Shortliffe ha descrito algunos criterios idealizados que deberían satisfacerse a la hora de comprobar si el problema es apropiado para aplicar una solución por computadora en la toma de decisión médica [59]. Tales criterios son:

- la necesidad evidente y demostrada de asistencia de la computadora,
- la necesidad reconocida de asistencia al médico,
- la existencia de un núcleo de conocimiento disponible y formalizado,
- un mecanismo directo para introducir la herramienta basada en ordenador en la rutina diaria,
- la identificación de colaboradores particularmente interesados, y
- evitar las principales barreras teóricas para el sistema prototipo inicial.

Efectividad del sistema

Una vez que se ha evaluado la adecuación del problema a la solución computerizada, será necesario evaluar la efectividad del sistema. Shortliffe propone que el sistema debe ser capaz de demostrar que [59]:

- es necesario,
- su nivel de ejecución es similar al de la experiencia médica,
- es útil,
- tiene un impacto positivo en la gestión y bienestar de los pacientes, y
- su relación coste-efectividad es alta.

2.3.5.3 Ventajas

El objetivo básico que subyace al desarrollar un sistema de información en un entorno clínico es la asistencia al médico y resto de personal sanitario experto en el diagnóstico y tratamiento de enfermos. Esta asistencia se concreta no sólo en herramientas que interpreten datos, lleguen a conclusiones razonables y aconsejen terapias al médico, sino en cualquier otro aspecto rutinario de la tarea clínica que resta

tiempo a la labor fundamental del personal sanitario como es el cuidado del paciente. Por ello, la informatización en el entorno sanitario, y en las Unidades de Cuidados Intensivos en particular, trae consigo una serie de ventajas, como son las siguientes [60]:

1. Mejora la asistencia al paciente, ya que la posibilidad de disponer de datos en formato electrónico reduce las pérdidas, los errores, y facilita la integración y presentación de resultados y su distribución al resto del equipo médico con lo cual el proceso de comunicación es más fluido.
2. Mejora la eficiencia, en el sentido de que los médicos tienen un acceso rápido, en el punto de asistencia, a todos los datos e información del paciente provenientes de la misma unidad o de otras, tal como puede ser el laboratorio. Por consiguiente, se reduce el tiempo a la hora de almacenar fichas, revisar documentos procedentes de varias fuentes e introducir datos que por su naturaleza no van a cambiar y, por tanto, sólo es necesario recogerlos una vez. Hay que tener en cuenta que los médicos, tal y como se veía en la Figura 4-3 pasan un 39% de su tiempo en la revisión de toda la documentación, por tanto una organización adecuada de los datos y su disponibilidad en tiempo y forma aceleraría notablemente esta búsqueda.
3. Proporciona mecanismos de ayuda a la decisión que tratan de suavizar el problema de la sobrecarga de datos y de información. Con ello se evita que el clínico, en sus procesos de razonamiento, olvide información que tiene disponible, y que debido a la gran cantidad de datos procedentes de muy diversas fuentes (i.e., resultados de laboratorio, monitores, historia clínica, etc.) puede pasar por alto. Además el sistema puede ayudar en la selección de nuevas pruebas de laboratorio, sugiriendo posibles diagnósticos, aconsejando terapias, etc.
4. Realiza tareas rutinarias de supervisión de pacientes e incorpora alarmas inteligentes. De esta forma es posible reducir la carga de trabajo al personal clínico, permitiendo que su trabajo se centre más en el cuidado del paciente.
5. En general, reduce los costes por paciente ya que, a tenor de lo expuesto, se reduce la documentación necesaria por paciente, existe un menor índice de solicitudes de repetición de pruebas de laboratorio, tan costosas, porque se

reduce el índice de pérdidas o extravíos, y se requiere menos personal realizando tareas administrativas.

Como conclusión, la instalación de un sistema de información en las unidades de cuidados intensivos maximiza la eficiencia y minimiza los costes, mientras presta su ayuda al personal clínico en tareas de toma de decisión.

2.3.5.4 Inconvenientes

El desarrollo e implantación de sistemas de información en el entorno sanitario es una realidad que tiene ya 3 décadas de edad. Aplicados en principio a tareas administrativas, los años 90 han ampliado su entorno de operaciones para tratar no sólo problemas administrativos sino también clínicos. Sin embargo, este desarrollo ha chocado con una limitada aceptación entre los médicos. La razón hay que buscarla en el hecho de que un sistema de información clínico interfiere con las práctica clínica rutinaria [61]. De hecho, la capacidad de estos sistemas para organizar la información y dar soporte a la práctica clínica obliga al médico y resto de personal implicado a cambiar la forma en que tradicionalmente almacenaba, recuperaba y utilizaba los datos clínicos. El éxito último de un sistema de información clínico depende de esto. Sin embargo, la experiencia de 3 décadas de historia sugiere que los médicos son reticentes a cambiar los patrones tradicionales en la práctica clínica [62].

Quizás la falta de adaptación de los médicos esté explicada por el hecho de que muchos sistemas desarrollados hasta ahora no tenían en cuenta ni el tipo de entorno para el cual iban diseñados ni el tipo de usuario que iba a interactuar con ellos. De aquí entonces que el personal clínico entendiera la labor del ordenador como mero “recolector y visualizador” de datos en el mejor de los casos. Además, como todo proceso software es necesario un proceso de validación y verificación, que en este caso es difícil de llevar a cabo, máxime cuando se trata de pacientes, en algunos casos, en estado grave. Como colofón, la inclusión de alarmas tradicionales para manejar situaciones anormales no se considera útil por parte del clínico debido a la alta incidencia de falsas alarmas. Como consecuencia, son totalmente ignoradas por el personal, que prefiere limitarse a las ya existentes en los dispositivos de monitorización.

2.3.5.5 Problemas de aplicación

El tiempo juega un papel preponderante en un entorno UCI. La monitorización y gestión de paciente exige que, en ocasiones y dependiendo de la gravedad del caso clínico, sea muy importante la rapidez de actuación del médico, ya sea en el diagnóstico o en la aplicación de una terapia inicial, para procurar el buen estado del paciente y, en todo caso, su estabilidad. Por esta razón, el tiempo es fundamental en tareas de actuación y toma de decisión, y para ello es necesario lograr una sincronización perfecta entre equipos de monitorización y el resto de equipos informáticos al objeto que la información pueda estar disponible cuando sea necesaria. Además es necesaria una labor de verificación y validación con el fin de obtener datos libres de errores. Esta etapa debe realizarse a dos niveles, en primera instancia a nivel de adquisición de datos, asegurando la disponibilidad de lecturas de señales correctas, para luego posteriormente efectuar tareas de validación de datos a nivel inferencial.

En los entornos hospitalarios avanzados es común encontrar una red de acceso a la información, principalmente diseñada para tareas administrativas, en la cual hay que asegurar y garantizar una comunicación de datos libre de errores. La informatización de una UCI debe considerar la topología de la nueva red que hay que configurar así como la interacción con la ya instalada, los dispositivos existentes que es necesario integrar y el tipo de usuarios que va a utilizar cada punto de acceso definido. Por ello es necesario analizar la configuración que proporcione flexibilidad, seguridad y velocidad. Sin embargo la integración de dispositivos topa con la ausencia de estándares comúnmente aceptados en la comunicación entre dispositivos médicos, como ya ha sido comentado.

Además, hay un denominador común en la mayoría de áreas clínicas, no sólo en las UCIs, como son las limitaciones financieras y que afectan a posibles inversiones en infraestructura informática, ya sea de tipo hardware como software. Los ajustados presupuestos de las unidades asistenciales fuerzan a controlar el coste de la asistencia sanitaria y la inversión tecnológica, con lo cual se prefiere la inversión en productos ya probados del mercado que se ajusten mínimamente a las necesidades existentes y que resuelvan el problema sin afrontar un cambio tecnológico a más alto nivel.

2.4 Resumen

Este capítulo repasa los fundamentos del proceso de diagnóstico médico. La toma de decisión clínica necesita datos fiables, conocimiento adecuado y métodos correctos de solución de problemas. El proceso, conocido popularmente como *consulta* necesita de una adecuada recolección de datos o casuística, en la cual se reflejen síntomas, signos y resultados de laboratorio, de una diagnosis y de recomendaciones terapéuticas. Estas tres fases constituyen lo que se llama ciclo hipotético-deductivo, en el cual los datos acumulados en cada etapa del ciclo se añaden al conjunto de observaciones para reformular, refinar o añadir nuevas hipótesis de trabajo hasta que una adquiere un cierto nivel de certeza. El proceso es difícil de modelizar en una computadora porque está basado más en heurísticas médicas que en metodologías bien definidas.

El capítulo hace un breve recorrido por las unidades de cuidados intensivos, describiendo el proceso de supervisión de pacientes en tres fases: inicialización, que establece parámetros relevantes para caracterizar y realizar el seguimiento del paciente y un plan de actuación; la ejecución o proceso de monitorización en sí; y la interpretación de datos, donde el conocimiento es de marcado carácter heurístico y evalúa y pondera las discrepancias encontradas entre los valores reales y los esperados, lo cual se traduce en un plan terapéutico. Las unidades de cuidados intensivos introducen problemas adicionales como son la gran cantidad de datos que se generan para cada paciente y las restricciones temporales del entorno. Cualquier desarrollo informático-inteligente en el área debe asistir en las tareas de adquisición de datos con distintos instrumentos de forma no secuencial, ser adaptable al contexto, reconocer datos erróneos e información inconsistente y priorizar las diferentes tareas de monitorización.

3. ANTECEDENTES Y REALIZACIONES PREVIAS

*Los profesores abren la puerta, pero tu tienes
que entrar por ti mismo.
(Proverbio chino)*

*El único error en realidad es aquel del cual no
aprendemos nada.
(John Powell)*

3.1 Introducción

Los unidades de cuidados intensivos utilizan una tecnología muy sofisticada en equipos de soporte de funciones vitales, con lo cual la gestión efectiva de pacientes debe interpretar muchas variables, evaluar comparativamente muchas opciones de terapia y controlar muchos parámetros del paciente. La gran cantidad de variables y la frecuencia de las observaciones puede sobrecargar la tarea del médico. Además, a medida que se desarrollan nuevas tecnologías y tratamientos, el número de opciones terapéuticas se incrementa, contribuyendo a que el número de errores clínicos también aumente. Estos problemas se interrelacionan cuando la cualificación del equipo UCI se reparte entre bastantes miembros, cuando se incorporan nuevos médicos y enfermeras sin experiencia, o cuando el número de pacientes excede la capacidad del clínico cualificado.

Todo ello plantea la necesidad de aplicar la tecnología informática al entorno UCI, ofreciendo soluciones a problemas básicos como son las alarmas inteligentes, la interpretación y síntesis de datos, la sugerencia terapéutica y el control sobre parámetros de funcionamiento de los monitores, dejando la evaluación del paciente y la planificación de terapia a los médicos. La investigación de sistemas expertos ofrece algo más sobre monitorización inteligente pero tiene capacidades limitadas de razonamiento y representación del conocimiento y ningún mecanismo para restricciones de tiempo real. En suma, la investigación hasta la fecha se clasifica, bien en ingeniería a corto plazo de soluciones a problemas inmediatos estrechamente definidos o bien en investigación a largo plazo sobre temas potencialmente relevantes a los cuidados intensivos [71].

Este capítulo hace una breve revisión de algunos de los sistemas más representativos en el contexto de la aplicación de las técnicas de Inteligencia Artificial al dominio de la respiración de pacientes con asistencia ventilatoria mecánica. La meta

última de todos estos sistemas es promover la respiración espontánea del paciente. Para ello es necesario reducir progresivamente su dependencia del ventilador ajustando los parámetros de funcionamiento de la máquina o *settings*. Este proceso o transición dependencia-independencia se denomina *weaning* o “destete” [90][91]. El éxito del proceso depende de una serie de variables del paciente como son, entre otras:

- Los análisis de laboratorio de gases en sangre arterial (ABG), pH, pCO₂ y pO₂, que informan sobre el estado oxigenatorio de la sangre y sobre el balance ácido-base.
- El esfuerzo respiratorio, obtenido del ventilador como dos parámetros, volumen tidal y esfuerzo espontáneo, que indican la capacidad del paciente para mantener una respiración autónoma y determinan la profundidad de la anestesia después de una operación.
- La hemodinámica, representada por las presiones sistólica y diastólica, que hablan de la estabilidad del sistema cardiovasculario.

3.2 VM

El Ventilator Manager (VM) es un sistema de monitorización pionero diseñado por Lawrence Fagan en 1980 para la gestión de pacientes postoperatorios que reciben ventilación mecánica en las unidades de cuidados intensivos [63][64].

3.2.1 Objetivos o metas del sistema

VM usa técnicas de Inteligencia Artificial para representar y manipular el conocimiento médico necesario para llevar acabo las tareas indicadas. Es un sistema dirigido por expectativas, ya que usa la historia pasada y actual del paciente para establecer los límites de interpretación de las variables del sistema de monitorización. Las medidas fuera de estos límites durante un período de tiempo sugieren la existencia de situaciones clínicas que requieren el ajuste del equipo de soporte vital u otras acciones terapéuticas por parte del médico. VM está también dirigido por las metas ya que establece metas terapéuticas consistentes con las tendencias en el estatus clínico del paciente. Estas metas se usan para asesorar sobre ajustes en el ventilador y la elección del modelo de respiración.

3.2.2 Ciclo de ejecución del sistema

El sistema realiza 5 tareas especializadas en la UCI:

1. Detecta de posibles medidas erróneas,
2. Reconoce eventos desfavorables en el sistema paciente/máquina y sugiere acciones correctivas,
3. Resume e integra el estatus fisiológico del paciente,
4. Sugiere ajustes a la terapia basándose en el estatus del paciente a lo largo del tiempo y metas terapéuticas a largo plazo,
5. Mantiene un conjunto de metas y expectativas específicas del paciente para una evaluación futura por el programa.

VM genera un conjunto de interpretaciones de las medidas fisiológicas en el tiempo, usando un modelo de los procedimientos terapéuticos de las UCI y conocimiento clínico sobre las implicaciones de diagnóstico de los datos. La interpretación se lleva a cabo recogiendo datos en diferentes contextos terapéuticos y usando un modelo de transición de estados del paciente. La interpretación correcta depende del estado en el cual se encuentra el paciente. Las metas para la gestión de pacientes también están determinadas en términos de estos contextos clínicos. El programa mantiene descripciones de las terapias ventilatorias actual y óptima para cualquier momento dado.

3.2.3 Arquitectura del sistema

VM esta integrado por 5 módulos diferentes, que se corresponden con los 5 núcleos de conocimiento del sistema. Cada módulo se encarga de aplicar el conocimiento correspondiente al contexto en el cual se encuentre el estado del paciente:

1. El módulo de instrumentación examina las medidas para comprobar si son consistentes y si están dentro de los límites fisiológicos significativos.
2. El módulo de transición detecta el cambio de estado del paciente y define un nuevo contexto examinando las variaciones a largo plazo en los valores de las variables.

3. El módulo de inicialización se aplica cuando ha cambiado el contexto y determina los límites futuros ideales, aceptables e inaceptables para muchas medidas. El conocimiento que integra este módulo se encuentra separado del módulo de transición ya que el registro histórico del paciente puede implicar un conjunto diferente de expectativas.
4. El módulo de estatus usa las clasificaciones simbólicas para derivar los estados fisiológicos más abstractos (por ejemplo, la determinación de hipertensión en el paciente), que son la base para la selección de terapia.
5. Por último, el módulo de terapia determina la terapia ventilatoria a largo plazo y la posible respuesta a problemas clínicos que se puedan plantear.

3.2.4 Descripción y representación del conocimiento

La representación del conocimiento está basada en reglas de producción, organizadas por el tipo de conclusión. Cada regla sugiere una situación clínica específica, ya sea diagnóstica o terapéutica, y expectativas apropiadas basadas en el reconocimiento de esta situación. El conjunto de reglas representa un modelo de terapia en la UCI.

El conocimiento está basado en las relaciones existentes entre varios parámetros del dominio, cuyos valores pueden variar con el tiempo, pero cuya persistencia puede ser diferente. Para cada parámetro se define una serie de propiedades que especifican dónde se usa el parámetro o cual es la validez temporal de su valor.

Estructura de las reglas de producción

La estructura de una regla en VM está formada por una parte premisa y una parte de acción, que se divide en tres secciones: interpretaciones, sugerencias y expectativas. En la primera sección, si la misma conclusión ha sido aseverada en el instante de tiempo más reciente, entonces la nueva conclusión se considera como continuación de la misma situación, y se amplía el intervalo de tiempo para contenerla. Por otra parte, la segunda sección de la conclusión de la regla es una lista de sugerencias entre las que incluyen factores adicionales que el programa no ha podido verificar. La última sección es la generación de nuevas expectativas con respecto a los rangos futuros de medidas bien durante un intervalo de tiempo futuro o bien durante el tiempo que dure una situación.

La mayoría de las reglas representan simbólicamente valores de medidas, usando los términos *aceptable* o *ideal* para caracterizar los rangos apropiados.. El significado actual de *aceptable* cambia según el paciente evoluciona de un estado a otro, pero la declaración que expresa la relación entre las medidas fisiológicas permanece constante, lo cual minimiza el número de reglas necesarias para describir la complejidad de la situación diagnóstica. El significado del rango simbólico se determina por medio de reglas que establecen expectativas sobre el valor de los datos medidos.

Ciclo de ejecución

La base de conocimientos incluye reglas relativas a 5 procesos de razonamiento que son evaluados al comienzo de cada nuevo segmento temporal. El objetivo es:

1. Caracterizar los datos medidos, razonables o espúreos.
2. Determinar el estado terapéutico del paciente (e.g. el modo de ventilación).
3. Ajustar expectativas de valores futuros de variables medidas cuando el estado del paciente cambia.
4. Examinar el estatus fisiológico en términos de frecuencia cardíaca, hemodinámica, ventilación y oxigenación.
5. Comprobar la compliance¹¹ con metas terapéuticas a largo plazo. Cada paso de razonamiento está asociado con una colección de reglas clasificadas por el tipo de conclusión. La evaluación de cada regla conlleva determinar si es aplicable al contexto actual, para luego, en caso de serlo, examinar la premisa y anotar las conclusiones definiendo las expectativas sobre los futuros rangos de valores medidos.

Estrategia de control

El intérprete de las reglas, que usa una estrategia de encadenamiento progresivo dirigida por los datos, es el encargado de verificar si la información adquirida en un intervalo de tiempo anterior es todavía válida para realizar conclusiones y reevaluar el

¹¹ Cálculo de la elasticidad o expandibilidad de los pulmones medida cuando el flujo de aire en los pulmones ha cesado, es decir, cuando se aguanta la respiración.

conjunto de reglas cada vez que está disponible nueva información. La fiabilidad de los valores medidos con anterioridad se determina bien evaluando una constante de tiempo, si la variable cambia predeciblemente en el tiempo, o bien evaluando una regla en los casos en que la fiabilidad sea dependiente de información específica del contexto.

La estrategia de control evalúa las reglas de cada nivel de abstracción siguiendo una estructura lógica: en primer lugar la validación de datos, seguida por la comprobación de los contextos presentes y la consiguiente determinación de expectativas, la valoración del estatus fisiológico y, finalmente, la respuesta terapéutica si es necesaria. La ejecución de cada regla viene por supuesto precedida de una verificación de su aplicabilidad en el contexto actual, y si tiene éxito será ejecutada.

Para el establecimiento de los *settings* terapéuticos apropiados al paciente VM incorpora un modelo. A medida que se proporcionan nuevos datos, VM hace suposiciones sobre si estos intervalos son lo suficientemente cortos para asegurar la continuidad de las conclusiones hechas en diferentes marcos temporales. Para ello el sistema necesita tener conocimiento sobre cómo pueden cambiar en el tiempo las medidas, los estados fisiológicos e la información sobre el estatus general del paciente. La determinación de tendencias en el estado del paciente requiere desarrollar técnicas y conocimiento especializado para examinar las relaciones temporales entre conclusiones de alto nivel. Estas técnicas podrían ser usadas para llenar conclusiones cuando las medidas básicas son espúreas.

Un aspecto destacable en el proceso de razonamiento es el uso de información del pasado para la generación de expectativas. La historia de los valores de los parámetros puede ser combinada con los datos actuales para generar expectativas sobre los rangos futuros de estas medidas. Ya que estas expectativas cambian en respuesta a eventos en la UCI, representan la naturaleza sensible al contexto del proceso de interpretación.

3.2.5 Comentario crítico

La investigación en AI se ha visto enriquecida con el desarrollo de VM en tres aspectos:

- El diseño de sistemas expertos que operan en un entorno dinámicamente cambiante. Para ello el intérprete de reglas de VM evalúa incrementalmente los datos e infiere si los nuevos eventos o conclusiones son extensiones de

conclusiones previas usando la relación entre el tiempo en que la conclusión previa fue realizada y el tiempo asociado con los nuevos datos. La validez temporal de los datos vendrá determinada por la gravedad de las conclusiones obtenidas, es decir, cuanto más severas sean las conclusiones, más frecuentemente se obtendrán las medidas.

- La representación del conocimiento médico en un formalismo de regla de producción. En concreto, la base de conocimientos fue organizada de acuerdo a dos aspectos: la selección de niveles apropiados para la subdividir la interpretación de los datos en conclusiones abstractas y la construcción de un modelo del entorno que proporcione un contexto de interpretación de los datos. Por otra parte, el diseño de las reglas de producción siguió tres directrices fundamentales: la conversión de términos simbólicos a numéricos tan pronto como fuera posible en el proceso de interpretación, la utilización del mayor número de conclusiones abstractas y la introducción de conceptos intermedios como medio de organizar el conocimiento. Todo ello significó un nivel extra de interpretación al hacer explícitas las comparaciones de los datos con la norma potenciando por ello el procesamiento simbólico frente al cuantitativo, además de facilitar una referencia uniforme frente a los datos. Con ello las tareas de categorización de los datos se separan de los hechos fisiológicos.
- La comprensión del proceso operativo de solución de problemas clínicos, principalmente en lo relativo a la interpretación contextualizada de los datos dependiendo de la realidad de la situación del paciente y a los métodos para modelizar las recomendaciones terapéuticas, en especial, en lo referente a la validez temporal de las sugerencias.

En la exposición de su sistema, Fagan describe algunos puntos de mejora, como son los siguientes:

- La incapacidad de esquema de representación para modelar ciertas acciones, tales como la planificación de complicadas terapéuticas.
- El incremento en la especificidad de las expectativas para cubrir un mayor número de clases de pacientes; y

- La incapacidad para representar o codificar algún término lingüístico asociado normalmente con el razonamiento médico basado en el tiempo

3.3 PUFF

PUFF [65] es un sistema experto de interpretación de resultados de test respiratorios aplicados a pacientes aquejados de enfermedades pulmonares. Fue desarrollado en EMYCIN, una generalización del paradigma MYCIN. Como resultado de su tarea, PUFF produce un conjunto de interpretaciones y una diagnosis para el paciente, de la misma forma que el fisiólogo pulmonar interpreta las medidas para determinar la presencia y severidad de una enfermedad pulmonar.

Las razón para desarrollar un sistema de interpretación automática puede resumirse en los siguientes motivos:

1. La realización e interpretación de pruebas de función pulmonar es una tarea común en la mayoría de los hospitales.
2. PUFF interpreta los datos sin necesidad de interacción con el usuario.
3. El conocimiento específico del dominio involucrado en un test de función pulmonar es lo suficientemente limitado como para hacer factible la adquisición, comprensión y representación de ese conocimiento.
4. El dominio del fisiólogo pulmonar es un campo circunscrito: los datos necesarios para interpretar el estatus del paciente están disponibles a través de la historia del paciente y de las medidas del laboratorio.

3.3.1 Descripción y representación del conocimiento

El conocimiento del sistema esta representado en forma de reglas de producción, las cuales operan sobre triplas asociativas atributo-objeto-valor, donde los atributos son los parámetros clínicos, el objeto es el paciente y los valores vienen dados por los datos del paciente y los resultados del test pulmonar.

La base de conocimientos consiste en un conjunto de reglas de producción que se ocupan de la interpretación de los datos del test de función pulmonar y un conjunto de

parámetros clínicos. La versión BASIC¹² ha sido ampliada con más reglas y más parámetros clínicos, y de esta forma acumula un total de 400 reglas y 75 parámetros. Estos últimos representan los resultados del test, los datos del paciente y los datos derivados de ejecución de las reglas. Además, es posible que en determinados casos existan, asociados al parámetro, una serie de valores esperados.

3.3.2 Arquitectura del sistema

En un principio, PUFF fue construido con EMYCIN, que hereda las características independientes de MYCIN, principalmente los módulos de adquisición de conocimiento, explicación y el intérprete de reglas. El sistema proporcionaba un mecanismo para representar conocimiento específico del dominio en forma de reglas de producción y para ejecutar consultas en ese dominio. De este modo, PUFF consistía en EMYCIN y una base de conocimientos de diagnóstico pulmonar. Una segunda versión del sistema fue creada después de refinar la versión EMYCIN, trasladando las reglas de producción en procedimientos escritos en el lenguaje de programación BASIC.

3.3.3 Ciclo de ejecución del sistema

La estructura de control dirige los procesos inferenciales siguiendo un encadenamiento regresivo. La meta del sistema en cualquier momento es determinar el valor para un parámetro dado, para lo cual dirige su atención hacia una lista de reglas que concluyan valores sobre el parámetro en cuestión. Si las reglas no consiguen su objetivo, el valor del parámetro se le pregunta al usuario. Como resultado del proceso de razonamiento, PUFF genera un informe en el cual aparecen en primer lugar los datos del test pulmonar, seguidos por la interpretación y el diagnóstico pulmonar obtenido. El fisiólogo es, sin embargo, quien verifica y valida estos resultados antes de almacenarlos en la ficha del paciente.

¹² El lenguaje de programación BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code) se desarrolló en Dartmouth en 1964 por John Kemeny y Thomas Kurtz

3.3.4 Comentario crítico

Según los autores, la *performance* exhibida por PUFF como asistente práctico del especialista pulmonar ha sido lo suficientemente buena como para ser utilizado en rutina clínica. Sin embargo existen una serie de limitaciones en las siguientes áreas:

1. Representación de patrones típicos.
2. Adición o modificación de reglas para representar el conocimiento no codificado previamente.
3. Alteración del orden en el cual se requiere información durante la consulta,
4. Explicación de la *performance* del sistema.

El primer punto se refiere al hecho de que muchos casos pueden considerarse como simples variaciones de patrones típicos. PUFF no reconoce que un determinado caso encaje con un patrón típico, ni que difiera de una forma significativa de él, y por tanto la justificación de su diagnóstico adolece de la riqueza de explicación que podría usar el médico. En cuanto a la segunda limitación, si bien la representación del conocimiento en forma de reglas facilita la codificación, las posteriores adiciones o modificaciones del conocimiento embebido en ellas puede afectar la operación de otras reglas del sistema. Los últimos dos puntos se refieren a la versión de EMYCIN con que se ha construido PUFF, ya que tiene problemas en la interacción con el usuario y en la explicación de sus conclusiones.

A pesar de sus limitaciones, la versión BASIC de PUFF fue aceptada fácilmente (según sus autores) por el personal clínico ya que: (a) sus interpretaciones son precisas, (b) la explicación del diagnóstico es lo suficientemente detallada como para que el usuario tenga confianza en el sistema o en todo caso permita reconocer diagnósticos incorrectos, y (c) la integración en la rutina del laboratorio fue totalmente satisfactoria.

La fase de prueba fue llevada a cabo usando como conjunto de entrenamiento casos reales, modificando la base de conocimientos, hasta que sus resultados fueron satisfactorios. Un nuevo conjunto de entrenamiento fue suministrado tanto al sistema como a dos expertos, uno participante en el diseño del sistema. Los resultados mostraron un mayor grado de coincidencia entre el sistema y el experto que participó en su construcción, mientras que la concordancia entre el sistema y el segundo experto se situó en un 89%.

3.4 ESTER

ESTER es un sistema experto diseñado como supervisor de la aplicación de técnicas IMV a pacientes postoperatorios o dependientes de respiración artificial durante un período prolongado [66].

3.4.1 Objetivos o metas del sistema

El objetivo fundamental de ESTER es asistir en el proceso de eliminación gradual de ventilación mecánica, ya que la desconexión del paciente del ventilador es un proceso normalmente largo y difícil. La estrategia adoptada por ESTER es cuantificar la fragilidad del estado del paciente antes del comienzo del llamado destete respiratorio y, considerando los análisis y la adaptación y evolución del paciente a sucesivos tratamientos, sugerir un cambio en la terapia o el mantenimiento de la actual.

3.4.2 Ciclo de ejecución del sistema

La condición global fisiopatológica del paciente se evalúa repetidamente durante el proceso de *weaning* considerando 3 aspectos específicos, como son el estado hemodinámico, respiratorio y gasométrico, cada uno de los cuales se caracteriza analizando las variables fisiológicas correspondientes. Además, el sistema analiza la estabilidad de los valores de dichas variables ya que la tendencia de ciertas variables es a veces más importante que su valor instantáneo. En cuanto a la consideración de las gasometrías del paciente, hay que significar que la función última de la respiración es el intercambio del CO₂ y O₂ a nivel de células y por ello, un paciente podría estar bien ventilado y, sin embargo, estar mal oxigenado.

Sobre la base de la condición fisiopatológica del paciente, ESTER selecciona entre 8 posibles regímenes ventilatorios: desde la ventilación mecánica ininterrumpida (CONT), pasando por períodos de ventilación mecánica alternando con períodos de silencio del ventilador, con modificación de las proporciones de tiempo dedicadas a cada fase (IMV), hasta la ventilación espontánea (SPON). A menos que la condición del paciente sea normal, el sistema no considerará un cambio de régimen terapéutico que signifique una reducción en la asistencia ventilatoria. Antes de proponer cualquier tentativa de cambio al médico, el sistema tiene en cuenta el estatus de riesgo del paciente (calculado a través de una versión modificada de los criterios APACHE-II [67])

y la facilidad de adaptación a regímenes anteriores. Cuanto mayor sea el riesgo evaluado y mayor el número de regresiones de regímenes menos asistidos a más asistidos por incapacidad para adaptarse el paciente a la nueva condición, más estrictas serán las condiciones fisiológicas que habrán que satisfacerse antes de proponer un cambio.

3.4.3 Descripción y representación del conocimiento

ESTER ha sido desarrollado usando GENIE, una herramienta de ingeniería de conocimiento diseñada para construir sistemas expertos médicos. El sistema consta de un módulo de conocimiento estático organizado en frames¹³, un módulo de conocimiento dinámico, estructurado en reglas de producción, y un módulo de control. El mecanismo de razonamiento usa dos estrategias de aplicación de reglas: encadenamiento regresivo y encadenamiento progresivo.

El módulo de conocimiento estático consta no sólo de las “frames” que soportan información sobre el paciente sino también de “frames” de control que controlan el modo en el cual el sistema busca los valores de los parámetros.

El conocimiento dinámico ha sido organizado en 8 bases de reglas, cada una dedicada a una tarea específica, con lo cual existe una clara separación entre las partes del problema. Además todas ellas contienen reglas de control para controlar el uso del resto, y metarreglas para gobernar el trabajo interno de las bases de reglas. El conjunto esta compuesto por las siguientes:

1. Hemodinámica: Evalúan la condición hemodinámica del paciente usando los parámetros hemodinámicos proporcionados por el usuario.
2. Respiración: Diagnostican la condición fisiopatológica en cuanto a la condición respiratoria analizando los parámetros respiratorios.
3. Estabilidad: Verifican la estabilidad respiratoria y hemodinámica el paciente considerando las variaciones en la presión arterial, frecuencia cardíaca y respiración endógena.
4. Gasometrías: Evalúan la calidad del intercambio gaseoso.

¹³ Marcos, estructura de representación declarativa del conocimiento

5. Estado: Obtiene un diagnóstico de la condición global fisiopatológica del paciente en base a las conclusiones previas de las 4 bases de reglas anteriores. Además, verifica que no ocurran contraindicaciones que indiquen la presencia de artefactos.
6. Terapia: Selecciona un régimen terapéutico sobre la base de la condición global del paciente.
7. Control: Revisa la terapia propuesta tomando en consideración la respuesta del paciente a regímenes previos y su estatus de riesgo.
8. Clasificación: Calcula el estatus de riesgo del paciente. Es la primera base de reglas que se activa durante una sesión con ESTER, aunque sus resultados son utilizados al final del proceso inferencial.

La herramienta de construcción GENIE proporciona dos mecanismos de control: la agenda, que es una lista de las tareas que hay que ejecutar, como puede ser la adquisición de datos, la aplicación de bases de reglas, la evaluación de otras agendas, ...); y el menú de entrada, que facilita la entrada de datos vía menús.

3.4.4 Arquitectura del sistema

ESTER, que actúa como una herramienta de ayuda a la supervisión clínica, es la parte inteligente de un sistema computacional de soporte respiratorio que controla las funciones de monitorización, extracción de valores de parámetros fisiológicos de las bioseñales monitorizadas y adaptación de la asistencia ventilatoria del paciente y realiza sugerencias terapéuticas. En la Figura 3-1 puede verse una representación gráfica del sistema.

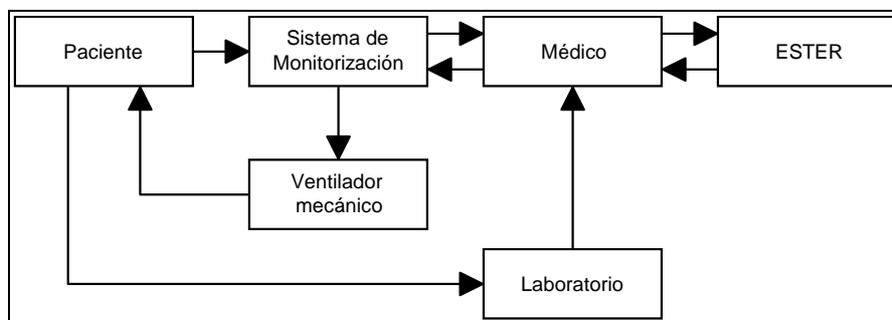


Figura 3-1: El sistema de soporte respiratorio en operación.

En el diseño del sistema, los anestesiólogos y especialistas de cuidados intensivos que colaboraron establecieron dos objetivos básicos: que las recomendaciones del sistema tuvieran en cuenta la evolución dinámica del paciente y que siguieran una estrategia terapéutica conservadora. La evolución de la condición del paciente se define como una sucesión de estados fisiopatológicos identificados mediante el análisis de las variables fisiológicas monitorizadas y otros parámetros. Esta evolución, sin embargo, no es lineal, ya que el paciente puede sufrir retornos a estados por los que ya ha transitado. Asimismo, el proceso de *weaning* debe proceder por ciclos siguiendo las fases de adquisición de datos, interpretación y decisión. Para ello, las situaciones hemodinámicas, respiratorias y gasométricas caracterizan juntas el estado global y permiten la toma de decisión terapéutica.

La estrategia conservadora del sistema implica que a menos que el estado del paciente sea mínimamente satisfactorio el *weaning* debe interrumpirse o en su caso no debe comenzar. Del mismo modo, el sistema incrementa la ventilación ante cualquier anomalía detectada mientras se investigan las causas de dicha anomalía. Hay que destacar que puede no existir una transición directa entre una ventilación mecánica total y la eliminación de la asistencia respiratoria, mientras que la transición inversa sí puede tener lugar si el sistema detecta que el estado del paciente no es satisfactorio durante un largo tiempo.

3.4.5 Comentario crítico

Los procesos de razonamiento de ESTER reproducen los que llevan a cabo los expertos humano en el área. En concreto, el sistema actúa progresando incrementalmente a través de una serie de niveles de abstracción desde los datos numéricos concernientes a las variables fisiológicas monitorizadas hasta el consejo terapéutico finalmente producido por el análisis global y contextual. Los resultados de la acción tomada son evaluados como parte del análisis siguiente. Otro aspecto que reproduce está representado por la estrategia de selección de reglas: el médico, cuando intenta evaluar aspectos específicos de la condición del paciente, busca datos clínicos que le permitan confirmar o rechazar ciertas hipótesis de trabajo. Una vez que las conclusiones iniciales han tomado cuerpo, utiliza dichas conclusiones preliminares y el resto de datos disponibles para inferir una conclusión final sobre la que basar una decisión terapéutica. En este sentido, el primer proceso está implementado como

encadenamiento regresivo, mientras que el segundo lo lleva a cabo el encadenamiento progresivo.

El desarrollo continuo del sistema se ve facilitado por la modularidad del conocimiento dinámico, cuya organización en 8 bases de reglas no sólo representa la división del conocimiento clínico en áreas precisas, sino que también facilita la corrección de reglas, la detección de posibles errores, la introducción de nuevas reglas, y la ampliación del alcance del sistema añadiendo nuevas bases de reglas y estructuras de control correspondientes.

3.5 KUSIVAR

KUSIVAR es un sistema experto para ventilación mecánica de pacientes adultos que padecen insuficiencia respiratoria [68]. Incluye tanto conocimiento cualitativo en forma de bases de reglas como conocimiento cuantitativo expresado como modelos matemáticos usados para la predicción y la optimización.

3.5.1 Metas del sistema

El principal objetivo de KUSIVAR es servir como guía en la gestión respiratoria, apoyándose en la idea de que un sistema de soporte a la decisión debe ayudar al personal clínico para recomendar la terapia de una forma más eficiente y puede reducir potencialmente la duración del tratamiento y los porcentajes de mortalidad. Las razones son sencillas: (1) el conocimiento experto puede estar siempre disponible a miembros del “staff” clínico de cuidados intensivos menos experimentados, (2) se soluciona el problema de la sobrecarga de datos que puede llevar a errores terapéuticos y de diagnóstico, y (3) se libera al clínico de funciones adecuadas para control automático como la estabilización de la concentración de CO₂ arterial. Además, el sistema integra un mecanismo de optimización que intenta alcanzar el valor deseado de un parámetro optimizando el índice fisiológico asociado a través de la modificación de una serie de variables de control. Por todo ello, la *performance* de las dos tareas de control, estabilización y optimización, aumenta con relación a los expertos humanos.

3.5.2 Arquitectura del sistema

KUSIVAR es un sistema en tiempo real que usa los datos del sistema de monitorización para la invocación de las reglas. La Figura 3-2 muestra una visión del flujo de datos en el sistema.

La base de conocimientos del sistema cubre tres fases:

- fase pre-respiratoria en la que se consideran indicaciones para conectar el paciente al respirador,
- fase de mantenimiento o ventilación mecánica continuada, y
- fase *weaning*, que define la estrategia para finalizar el soporte respiratorio.

KUSIVAR usa además modelos matemáticos del sistema respiratorio para simular los efectos de la terapia y también para propósitos de optimización y control.

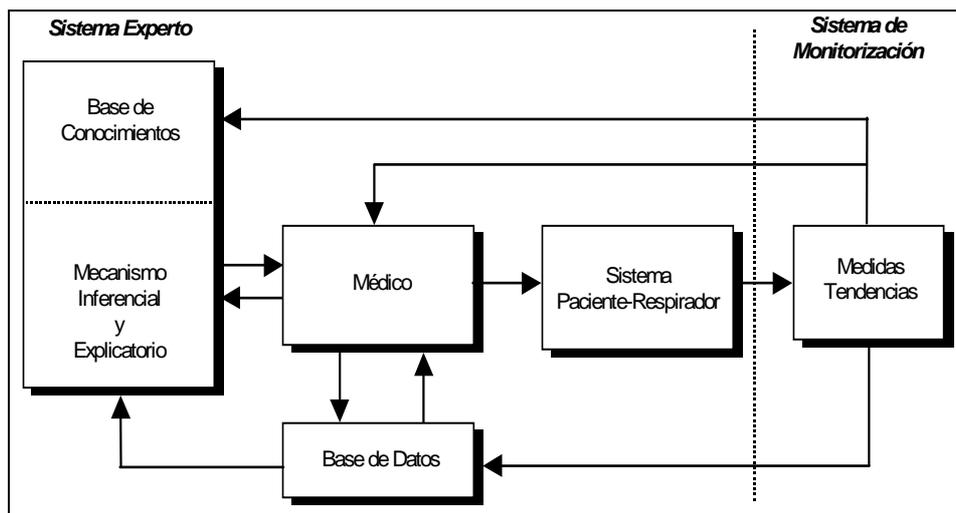


Figura 3-2: Flujo de datos en el sistema experto KUSIVAR

3.5.3 Descripción y representación del conocimiento

KUSIVAR usa varias formas de conocimiento en las distintas situaciones de decisión, como son el comienzo de la terapia, el ajuste de los parámetros del ventilador para una terapia óptima, la detección e identificación de complicaciones del paciente o del equipo, y la propuesta de terapias adecuadas. El conocimiento representado por variables de entrada y parámetros del modelo es bien de naturaleza discreta, con rangos de valores simbólicos como pueden ser los síntomas, bien de naturaleza continua, como la presión y el flujo espiratorio. El esquema de representación elegido, las reglas de

producción, es capaz de representar las decisiones y controlar el modelo matemático del sistema. Todo ello aparece representado en la Figura 3-3.

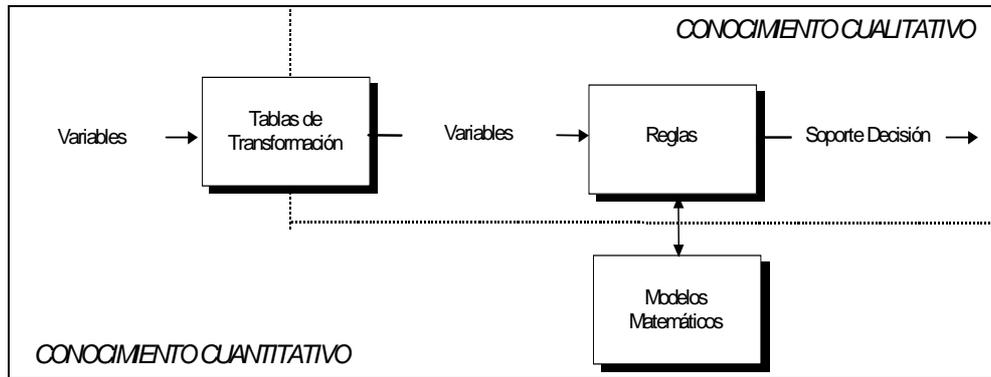


Figura 3-3: Representación del conocimiento en la base de conocimientos de KUSIVAR

Para llegar a cabo estas decisiones es necesario que las variables numéricas continuas sean transferidas a una escala de valor simbólico mediante el uso de tablas de transformación específicas para cada variable y estado del paciente [81]. La alternativa del uso del valor numérico directamente en las reglas habría incrementado la complejidad de la base de conocimientos.

La evolución temporal del valor de algunas variables es más interesante que el valor en sí mismo, sobre todo cuando esta tendencia es un indicador de un proceso del paciente o bien un evento del ventilador, como puede ser una desconexión accidental. Además, y como resultado del proceso de transformación simbólica, se usan dichas tendencias sobre ciertos intervalos como variables separadas en las reglas.

En algunos casos, por ejemplo en lo relacionado con los parámetros de funcionamiento del ventilador, la terapia resultante puede contener componentes numéricos que se calculan a través de los algoritmos del modelo fisiológico controlado por la base de reglas.

En los referente a la estrategia de razonamiento implementada, el sistema KUSIVAR está dirigido por los datos. Ello significa que si el valor de una variable medida cambia, se activa el correspondiente algoritmo de transformación, y si como resultado el valor simbólico cambiara, se activarían las reglas relacionadas con la variables. El proceso inferencial termina con una sugerencia terapéutica en forma de

cambio de *settings*, computados a través del modelo actual, o en forma de una alarma que muestra una complicación detectada combinada con una acción sugerida.

Conocimiento cualitativo

Las reglas de producción se clasifican en tres niveles diferentes atendiendo a la fases de la terapia actual: (1) conexión al respirador, (2) en el respirador, y (3) *weaning*.

La primera fase de la terapia se aplica a la situación en la que se considera la conexión del paciente al respirador. En esta fase se tiene en cuenta información general sobre el paciente, variables numéricas y discretas (síntomas). La salida de esta fase es una indicación o contraindicación concerniente a la conexión del paciente al respirador.

La segunda fase se refiere a la terapia respiratoria en marcha. Para evaluar el estado actual del paciente, de nuevo hay que tener en cuenta cierta información general sobre el paciente, valores actuales de las variables y cambios de variables con su referencia temporal (tendencias). Estos datos pueden interpretarse desde el punto de vista fisiológico tan sólo o llevar a cabo una diagnosis de las complicaciones, ya sean del paciente o del ventilador. En un nivel posterior, el sistema define el estado deseado del paciente y una terapia adecuada teniendo en cuenta además los *settings* iniciales del respirador. En ausencia de complicaciones, la terapia tan sólo ajustará los parámetros del respirador. En caso contrario, se requerirán más acciones terapéuticas. En todo caso, el sistema adopta la postura de consejero de la terapia respiratoria, aunque los autores incluirán sugerencias sobre administración de fármacos en versiones posteriores.

Cuando el paciente alcanza el estado deseado final para la segunda fase de la terapia, es posible la transición a la tercera fase, que necesita tener en cuenta idénticos factores que la segunda fase. Las alternativas de terapia representan distintos procedimientos de *weaning* hasta que el paciente pueda respirar espontáneamente. En caso de complicaciones serias, el *weaning* se abandona y se retorna a la fase anterior de terapia durante un período más largo.

Conocimiento cuantitativo

La estabilización de las concentraciones de O₂ y CO₂ en sangre arterial es la meta de la ventilación mecánica. Dicho proceso es un método de prueba y error que modifica los *settings* del ventilador sobre la base de las concentraciones de dichos gases. La

optimización de este proceso se ha llevado a cabo, no a través del modelo matemático fisiológico del paciente, difícil de construir por la complicada mecánica de intercambio gaseoso, sino a través de una aproximación estadística, en la cual a partir del conocimiento de valores de variables de entrada y salida para una cierta población, se determinaron los coeficientes de las ecuaciones del modelo matemático [68].

La aplicación principal del modelo constituye la simulación de los cambios de las variables fisiológicas causados por modificaciones en los parámetros de funcionamiento del ventilador y la optimización de la terapia.

3.5.4 Ciclo de ejecución del sistema

Uno de las cualidades esenciales que debe tener un sistema de soporte a la decisión es no ralentizar los procedimientos de trabajo del clínico. De esta forma, KUSIVAR funciona principalmente como consejero, aunque otros modos de interacción con el usuario, como el modo automático, semiautomático o crítico, también han sido implementados.

Como el sistema ha sido diseñado bajo la condición de no sobrecargar de información innecesaria al personal clínico tan sólo muestra el diagnóstico del paciente y los parámetros de funcionamiento del ventilador. A medida que surgen complicaciones, y dependiendo de la severidad, aparece más información en forma de complicaciones detectadas, sugerencias terapéuticas, tendencias y valores anormales que el usuario puede ir seleccionando. En cualquier caso, el cambio de los parámetros ventilatorios es responsabilidad única del clínico. Sin embargo, y a diferencia del anterior, en los modos semiautomático y automático el sistema es el responsable de cambiar los parámetros del ventilador, si bien tan sólo en el primero es el médico quien prescribe la nueva terapéutica ventilatoria.

La capacidad de explicación con que ha sido diseñado se manifiesta tanto en la detección de complicaciones ya comentada, como en situaciones de decisión, llegando incluso a justificar sus conclusiones visualizando las reglas activadas.

3.5.5 Comentario crítico

La mejora en la calidad del tratamiento respiratorio a través del uso de sistemas de soporte a la decisión como KUSIVAR se explica en la disponibilidad de una

monitorización integrada, que incluye una visualización eficiente de datos y una interpretación de valores que reduce fundamentalmente el riesgo de sobrecarga de información y, como consecuencia, el riesgo errores diagnósticos y terapéuticos. KUSIVAR proporciona además soporte experto en lo que respecta a la prescripción y optimización de terapias, incluso en situaciones que requieren una acción rápida. Además, y merced a la reducción de la duración del tratamiento, el sistema demuestra un descenso en el coste de la terapia respiratoria.

Las sucesivas ampliaciones del sistema irán incorporando mayor funcionalidad en el modo automático de funcionamiento del sistema, en especial en el control de concentración de gases arteriales.

3.6 WEANPRO

WEANPRO es un sistema basado en conocimiento que asiste al personal clínico, experto en terapias respiratorias, en el proceso de *weaning* de pacientes postoperatorios cardiovasculares en Unidades de Cuidados Intensivos [69].

3.6.1 Metas del sistema

En un análisis preliminar del entorno los autores han tenido en cuenta que conviven dos problemas importantes en el proceso de *weaning*, por otra parte carente de cualquier método estándar:

- El primero es de tipo económico y tiene que ver con el coste asociado a la realización de innecesarias pruebas de laboratorio de gases sanguíneos en sangre arterial (ABG).
- El segundo es de carácter clínico y hace referencia a que, por regla general, en el proceso de destete hay implicados varios médicos a causa de que puede prolongarse durante varias horas. Por ello, es normal que se mezclen diferentes criterios, entornos educacionales, experiencias y cualificaciones. Como resultado, el *weaning* puede estar basado en datos inconsistentes.

Para minimizar este tipo de problemas, así como los inherentes al proceso de *weaning* en si, se desarrolló un sistema basado en conocimiento, WEANPRO, para el que se fijaron como objetivos:

- Proporcionar consejos consistentes sistematizando y estandarizando la información requerida y las recomendaciones terapéuticas ofrecidas durante el *weaning*.
- Servir como medio transmisor de conocimiento experto del proceso de *weaning* a todos los niveles del personal clínico involucrado.
- Minimizar de forma significativa el número medio de análisis de gases en sangre arterial requeridos a través de todo el proceso de *weaning* del paciente.
- Ofrecer explicaciones de su razonamiento así como de sus conclusiones y consejos.

3.6.2 Descripción y representación del conocimiento

El conocimiento del sistema se obtuvo a través de entrevistas con un equipo de expertos y se estructuró en forma de reglas IF-THEN almacenadas en 8 bases de reglas que se encargan de interactuar unas con otras usando como estrategia inferencial el encadenamiento regresivo para gestionar el proceso de *destete* desde que el paciente llega a la UCI hasta que se le elimina la ventilación [70]. La base de conocimientos principal dirige la ejecución del sistema pasando el control a una de las cuatro bases de conocimiento secundarias basándose en el progreso del proceso de *weaning* del paciente. Cada una de éstas obtiene información de dos bases de conocimiento de decisión: la primera determina el esfuerzo respiratorio espontáneo del paciente mientras que la segunda evalúa las gasometrías del paciente para recomendar cambios en ventilador.

3.6.3 Arquitectura del sistema

La arquitectura global del sistema en el entorno clínico se muestra en la Figura 3-4.

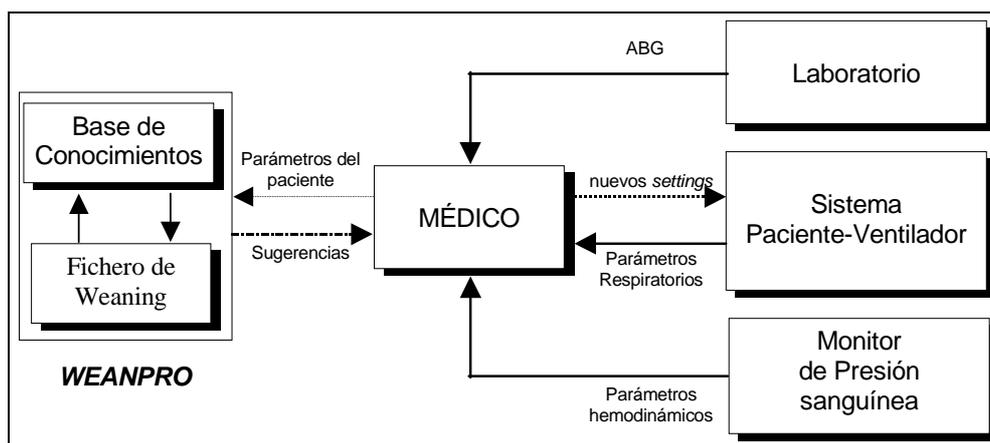


Figura 3-4: Arquitectura global del sistema WEANPRO

3.6.4 Ciclo de ejecución del sistema

El proceso de ejecución del sistema sigue la secuencia siguiente:

- El médico introduce los datos demográficos del nuevo paciente.
- En un primer momento llegan los datos de laboratorio de ABG.
- El médico introduce estos datos, además de los datos respiratorios y hemodinámicos del paciente.
- El sistema razona heurísticamente con estos datos y recomienda, si fuera el caso, un cambio en los parámetros actuales de funcionamiento del ventilador.
- A continuación, el clínico decide si acepta o no el consejo del sistema, quedando bajo su entera responsabilidad el cambio de alguno de los *settings* del ventilador.

Como resultado del proceso inferencial la salida del sistema toma es de tres formas: (1) Una pantalla de preguntas y sugerencias intermedia, (2) una lista de avisos o *warnings*, que representan condiciones lo suficientemente serias como para no garantizar el éxito del *weaning* y por ello se requiere la opinión médica para continuar o no con el proceso y (3) un informe de los *settings* actuales, resultados de ABG, parámetros respiratorios, así como las sugerencias de cambios en los *settings* y su justificación. En la Figura 3-5 podemos ver un ejemplo.

```
-----  
Fri, Mar 10, 1989  3:59 PM          NAME: sample_case          ROOM: 468  
-----  
CURRENT SETTINGS                REPORTED VALUES  
FiO2      = 40%                Total rate = 6      pO2  = 112 mmHg  
Set rate  = 6                  Spont VT = 0       pCO2 = 50 mmHg  
Set VT    = 650                Acceptable VT = 235 pH   = 7.26  
PEEP     = 5                   Hemodynamics are unimportant  
  
Based on the above information, it is my belief that a pH of 7.26 with  
a pCO2 of 50 mmhg indicates the presence of a possibly severe problem  
with the patient's aci-base balance.  
  
Please, inform a physician of this condition and inquire if this  
patient can continue being weaned using the WEANPRO system.  
-----  
The recommendations offered by WEANPRO are only suggestions. Under no  
circumstances should you follow these recommendations if you have any  
professional reservations as to the validity of the recommendations.
```

**Figura 3-5: Informe de resultados de WEANPRO indicando una
situación de alerta.**

Para el mantenimiento de información histórica, el sistema genera un informe final en un fichero por paciente en el cual se almacena un registro completo de todo el proceso de destete, incluyendo registros temporales, parámetros del ventilador, análisis de ABG, recomendaciones y sugerencias del sistema, etc.

3.6.5 Comentario crítico

La principal aportación del sistema WEANPRO al proceso de *weaning* de pacientes UCI es la reducción del número medio de pruebas de laboratorio de ABG que eran necesarias para destetar al paciente, con lo cual se logra un decremento en los costes por paciente. Con la implementación del sistema se ha logrado estandarizar de alguna forma el proceso de *weaning*, asegurando con ello que se llevan a cabo los procedimientos correctos. Además se ha conseguido hacer uso de forma más eficiente de la información contenida en los análisis, igualando el nivel de errores médico en el determinación de parámetros de manejo del ventilador.

El sistema ha sido ampliamente aceptado por parte del usuario debido a su facilidad de uso, su rapidez en la obtención de resultados en forma de recomendaciones, su competencia y su interfaz. Además ha obtenido una evaluación positiva en cuanto al acuerdo entre las sugerencias del sistema y las del clínico no involucrado en la construcción del sistema, si bien han existido diferencias entre grupos de expertos, quizás debido a factores de tipo educacional y de experiencia clínica.

3.7 GUARDIAN

En el proyecto GUARDIAN se trata de desarrollar un "agente inteligente" para la monitorización y diagnóstico de pacientes convalecientes de cirugía cardíaca en unidades de cuidados intensivos [71].

Según citan en su libro Russell y Norvig [1] “un agente es todo aquello que puede considerarse que percibe su ambiente mediante sensores y que responde o actúa en tal ambiente por medio de efectores”. Para Shoham [72] “es una entidad que funciona continua y autónomamente en el entorno en el cual tienen lugar otros procesos y existen otros agentes”. Para los autores de Guardian un “agente inteligente” en entornos clínicos debe poseer cualidades para: (1) actuar continuamente como sensor, interpretando, resumiendo y prediciendo rangos de datos del paciente, (2) construir, refinar, revisar e implementar planes terapéuticos a corto y largo plazo, (3) detectar, diagnosticar y corregir situaciones inmediatas de enfermedad y otros problemas, (4) controlar parámetros de gestión del paciente, (5) recomendar diagnósticas y acciones terapéuticas a los médicos, (6) explicar observaciones, diagnósticos, predicciones y terapias basadas en la fisiología, y por último, (7) responder a aquellas preguntas que se le formulen.

Para ejecutar estas tareas debe integrar conocimiento de tipo clínico sobre problemas comunes, síntomas y tratamientos, de tipo biológico sobre anatomía, fisiología y fisiopatología, y conocimiento de modelos físicos fundamentales y condiciones de fallo, así como incluir diversos niveles de razonamiento para la diagnosis, la predicción y la planificación. El funcionamiento continuo del sistema en el entorno debe coordinarse bajo una perspectiva unificada basada en la condición global del paciente, localizando sus recursos limitados entre tareas competitivas para satisfacer las restricciones temporales que impone su operación y sus conclusiones.

3.7.1 Metas del sistema

En concreto, el proyecto GUARDIAN desarrolla un agente inteligente experimental que:

- ejecuta y coordina un rango amplio de tareas de razonamiento inteligente usadas en monitorización UCI;

- realiza estas tareas de la forma más fiable en un amplio abanico de situaciones médicas;
- adapta el conjunto de requerimientos prácticos con un apropiado esfuerzo de desarrollo.

3.7.2 Arquitectura del sistema

En su nivel más alto GUARDIAN tiene componentes para la percepción de información del entorno, la acción sobre entidades de dicho entorno, y el razonamiento para interpretar la información percibida, solucionar problemas y planificar acciones.

La tarea del *preprocesador perceptual* es adquirir información del entorno para el razonamiento y la acción. Para ello muestrea variables continuamente de forma efectiva para no sobrecargarse de información y evitar razonamientos innecesarios, ya que cada dato dispararía bastantes operaciones de razonamiento, dando lugar a nuevos eventos o disparando nuevas operaciones. Esta estructura recupera las señales obtenidas de los sensores, las abstrae, comenta y filtra de acuerdo a las instrucciones del sistema de razonamiento y sitúa los resultados en un buffer de salida para que sean usados por el sistema de razonamiento o de acción.

El *sistema de acción* es el encargado de controlar la ejecución de las acciones sobre al entorno basándose en la percepción y el razonamiento. Entre las acciones más destacadas se pueden citar el cambio directo de *settings*, recomendar intervenciones para prevenir o corregir problemas y explicar su estrategia de monitorización, su razonamiento y los fenómenos fisiológicos y biológicos que explican las condiciones del paciente. El sistema de acción cumple una función muy importante que es liberar al sistema de razonamiento de la tarea de gestionar la ejecución de acciones de bajo nivel.

El *sistema de razonamiento* cumple las tareas de interpretar la información recibida del entorno, detectar, diagnosticar y predecir problemas, planificar y explicar las soluciones propuestas, y decidir sobre qué acción ejecutar. Además, es el responsable de la coordinación de los procesos concurrentes de percepción, razonamiento y acción. Dichos procesos se ejecutan de forma continua ya que se puede percibir cualquier evento, enviarlo inmediatamente al sistema de razonamiento y razonar independientemente de la frecuencia de llegada de nuevos eventos, con lo cual se garantiza que el resto de tareas no van a ser interrumpidas. Además, los tiempos de

reacción ante eventos del entorno son flexibles y muy diferentes, con lo cual es posible tener reacciones periféricas y muy rápidas, en el sistema de percepción o acción (e.g. modificación de una frecuencia de muestreo de una variable que ha subido repentinamente), acciones reflejas, rápidas, que ocurren entre los sistemas de percepción y acción y permiten a la primera dirigir la acción directamente (e.g. activación y explicación de una alarma) y, por último, reacciones cognitivas, que son lentas, e involucran los tres sistemas. La mayoría de operaciones en GUARDIAN son de este último tipo.

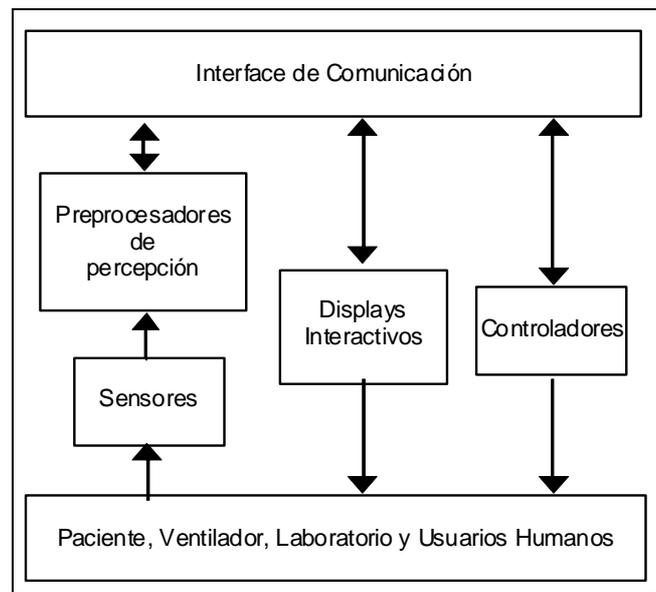


Figura 3-6: Componentes de la arquitectura de nivel más exterior de GUARDIAN

La Figura 3-6 representa las estructuras de nivel más exterior de GUARDIAN, las cuales operan concurrentemente y asíncronamente merced al interfaz de comunicación que reparte los datos entre ellos. La Figura 3-7 muestra la arquitectura de nivel más interior.

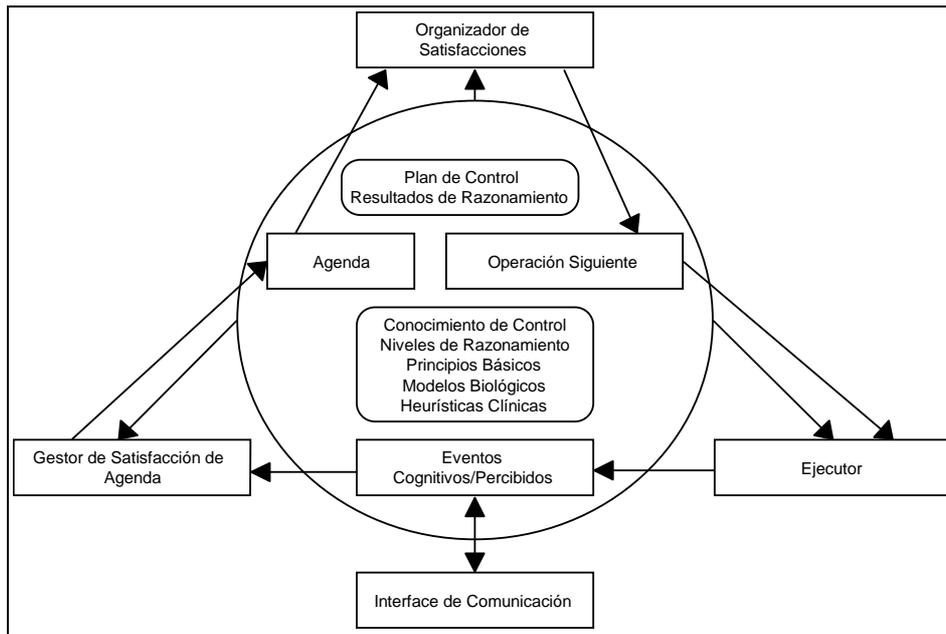


Figura 3-7: Componentes de la arquitectura de nivel más interior de GUARDIAN

3.7.3 Descripción y representación del conocimiento

GUARDIAN posee una memoria global que registra 3 clases de información: conocimiento, resultados del razonamiento y estados cognoscitivos.

El conocimiento representado en GUARDIAN es de dos tipos: (1) conocimiento de tipo factual, como las heurísticas clínicas, los modelos biológicos y los principios primarios, y (2) conocimiento de tipo procedimental, representado por operaciones y estrategias para el diagnóstico, la planificación, etc., que se disparan por eventos y producen a su vez cambios en la memoria global y nuevos eventos.

Los resultados del proceso de razonamiento que se obtienen son hipótesis, observaciones, diagnósticos, predicciones, planes, etc., organizados temporalmente y en relación unos con otros.

Por último, los estados cognoscitivos están integrados por la información transitoria usada en los procesos de razonamiento, almacenada y gestionada en 3 memorias: (1) el buffer de eventos, que almacena entradas perceptuales que llegan asíncronamente y eventos cognoscitivos producidos por el razonamiento; (2) la agenda, que agrupa operaciones de razonamiento ejecutables en el momento actual, es decir,

aquellas cuyas condiciones de disparo son satisfechas; y, por último, (3) el buffer que carga la siguiente operación de razonamiento a ejecutar.

3.7.4 Ciclo de razonamiento del sistema

El ciclo de ejecución básico del sistema es un proceso de 3 pasos:

1. El gestor de la agenda usa los eventos cognoscitivos y perceptuales de que se dispone y el plan de control activo para disparar operaciones de alta prioridad, registrándolas en la agenda.
2. El organizador usa el plan de control para determinar cuándo interrumpir la gestión de la agenda y qué operación ejecutar. Al mismo tiempo, registra esa operación como la siguiente operación.
3. El ejecutar dispara la operación siguiente, produciendo cambios en la mayoría global que afectan al preprocesamiento, al control o simplemente son resultados del razonamiento.

3.7.5 Comentario crítico

El proyecto GUARDIAN abarca un amplio abanico de problemas en la monitorización y control inteligente en tiempo real. Entre ellos sobresalen la adquisición e interpretación continua de datos, el diagnóstico de complicaciones y disparo de alarmas, la agilidad en la reacción a problemas agudos, la selección, ejecución y seguimiento de planes terapéuticos, la explicación de fenómenos fisiológicos, y el control en lazo cerrado de parámetros fisiológicos.

Según los autores, la introducción de GUARDIAN en la unidad de cuidados intensivos mejora sustancialmente la interacción con el personal clínico resumiendo el progreso y las condiciones del paciente, alertando de problemas inminentes, sugiriendo y criticando terapias alternativas y explicando las razones fisiológicas que subsisten bajo la condición del paciente.

3.8 SIMON

SIMON es un sistema de monitorización inteligente para pacientes neonatos con síndrome de distress respiratorio (RDS) [73]. El sistema se ha implementado como una serie de procesos independientes y asíncronos que llevan a cabo las tareas de recogida,

procesamiento y análisis de datos, interpretación del estatus del paciente, predicción de la evolución de las variables y parámetros monitorizados y presentación selectiva de información.

3.8.1 Metas del sistema

El sistema es capaz de elegir entre las diferentes fuentes de información y datos, y adaptar continuamente su estrategia en función de cambios en el entorno y en el estado del paciente. Otra característica importante es su capacidad para detectar medidas erróneas y de priorizar dinámicamente las tareas posibles en función de las demandas temporales del proceso seguido. SIMON utiliza con profusión el concepto de modularidad y lo extiende a todos y cada uno de los subprocesos que se llevan a cabo durante la monitorización.

El desarrollo de SIMON ha dado solución a cuatro problemas básicos en la monitorización de pacientes, como son:

- La utilización de modelos de pacientes para establecer contextos de monitorización.
- La reducción de información e interpretación de señales por medio de conocimiento específico de la señal, específico del contexto y específico de la tarea.
- La verificación de los instrumentos de medidas y diseño de alarmas inteligentes por medio de conocimiento; y
- El control en tiempo real del proceso de monitorización e integración funcional de procesos asíncronos.

3.8.2 Arquitectura del sistema

Para acometer las problemas anteriormente mencionadas, SIMON incorpora una arquitectura muy modular como puede verse en la Figura 3-8.

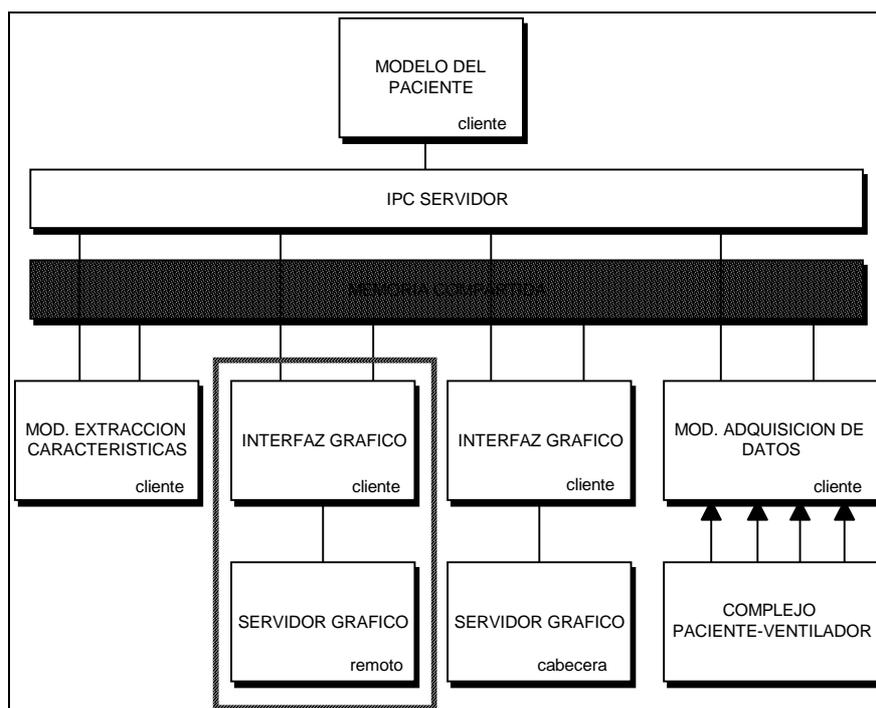


Figura 3-8: Visión general de la arquitectura de SIMON

La elaboración de un modelo de paciente se aborda desde el punto de vista de la física cualitativa, en concreto la teoría de procesos cualitativos. Así, en SIMON se definen "cantidades" como parámetros cuantificables o estimables en el dominio del discurso que pueden tomar valores numéricos o simbólicos, "vistas" definidas como contextos específicos, historias de cantidades y/o relaciones entre cantidades y, finalmente, "procesos" como mecanismos fisiológicos o terapéuticos que influyen sobre los valores de las cantidades.

Las relaciones cualitativas de SIMON se establecen por medio de "proporciones cualitativas" (qprops), definidas como relaciones monótonas crecientes o decrecientes entre cantidades, y por medio de "influencias", que representan el efecto directo de un proceso sobre una cantidad. Así, si se establece (qprop + A B) se indica que B aumentará siempre que A aumente. Por otra parte, (influencia + A P) indica que A aumenta cuando P es positivo.

El mecanismo de razonamiento SIMON supone, en primer lugar, la creación de un ejemplo del modelo, es decir, particularizar un caso del dominio. Para ello, el sistema examina las condiciones de activación de vistas y procesos. A continuación, el sistema predice evoluciones de las variables relevantes. En un tiempo posterior, el sistema compara los valores predichos con los observados y modifica, si procede, las

condiciones de activación de vistas y procesos para ajustar el modelo al caso real examinado. Este proceso puede verse esquemáticamente en la Figura 3-9.

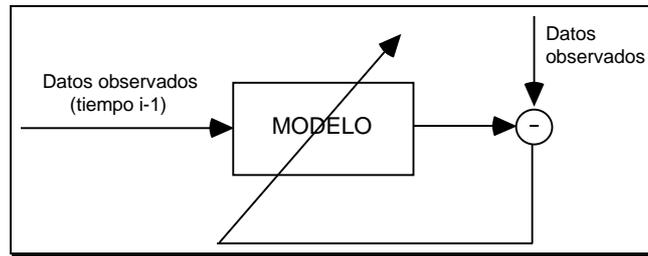


Figura 3-9: Refinamiento interactivo del modelo del paciente en SIMON

El ejemplo del modelo, que estima las condiciones del paciente en función de los valores cuantitativos o cualitativos de las cantidades, también es utilizado para establecer las condiciones de monitorización, para lo cual el sistema: (a) configura las prioridades, (b) establece las dependencias contextuales de los parámetros monitorizados, y (c) reconfigura dinámicamente el interfaz con el usuario. Las medidas erróneas también son detectadas por medio del modelo del paciente, que establece los rangos permitidos para cada variable, y configura lo que se podría llamar un "modelo de medidas erróneas".

3.8.3 Ciclo de ejecución del sistema

La Figura 3-10 muestra las relaciones de los distintos módulos del sistema. El esquema del funcionamiento sigue la siguiente secuencia:

1. Un nuevo dato llega al sistema a través del módulo de adquisición de datos, que lo ubica en la memoria compartida.
2. El objeto relevante (afectado por este nuevo dato) es informado acerca de la disponibilidad de un nuevo dato.
3. Todas las cantidades relacionadas con el objeto son informadas acerca del posible cambio de situación.
4. Si no se detecta ningún error en la nueva medida, el sistema calcula los nuevos valores de las cantidades afectadas y se verifica si todos los valores caen en el rango normal. De lo contrario se invoca el módulo de detección de errores. En cualquier caso el modelo del paciente es informado sobre los posibles

cambios, quien actúa en consecuencia (i.e., modificando su estrategia, asignando nuevas prioridades...).

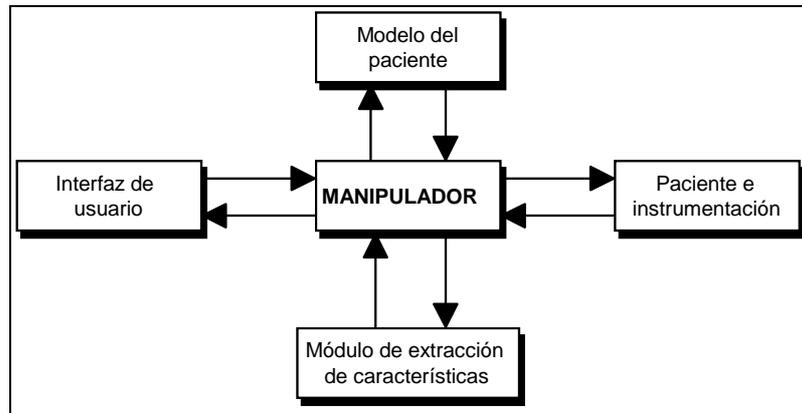


Figura 3-10: Interacción entre los diferentes módulos de SIMON

3.8.4 Comentario crítico

Un aspecto importante en la monitorización de pacientes es la interpretación de datos en contexto. SIMON resuelve este problema ya que es sensible al cambio de contexto y situación durante el proceso de monitorización y responde a todos los cambios reconfigurando sus estrategias de monitorización. Además, tal sensibilidad se establece en función de los valores predichos por SIMON de acuerdo a su modelo híbrido numérico-cualitativo que le permite, a partir de sus conocimientos fisiológicos, establecer criterios en función de las distintas situaciones.

Otras características de SIMON pueden resumirse en las siguientes:

1. Capacidad de reconfiguración en la adquisición de datos y procesamiento de bajo nivel de datos de entrada en respuesta a variaciones en las características de la señal (e.g. relación señal/ruido), o directivas dependientes del modelo dadas por el modelo.
2. Validación de datos de bajo nivel y de datos provenientes de sensores utilizando conocimiento específico del dominio relacionando información extraída de varias fuentes de datos.
3. Visualización de información dependiente del contexto.
4. Interpretación de alto nivel del estatus del paciente, predicción y definición de un contexto de monitorización usado para enviar órdenes tanto al módulo de

extracción de características como a los componentes de presentación de datos del sistema.

5. Operación en tiempo real.

3.9 VIE-VENT

VIE-VENT es un sistema de monitorización de lazo abierto y planificación de terapia basado en conocimiento para ventilación artificial de neonatos [74] [75].

3.9.1 Metas del sistema

El desarrollo del proyecto VIE-VENT ha tratado de satisfacer una serie de objetivos, resumidos en tres categorías: (a) arquitectura del sistema, (b) interpretación de datos, y (c) monitorización basada en conocimiento y planificación de terapia.

VIE-VENT es una arquitectura modular, en analogía al proceso de razonamiento clínico, cuya característica de extensibilidad está basada en la reusabilidad de los componentes. La implementación del sistema permite el razonamiento en ausencia de datos, inclusive con datos erróneos o imprecisos. Además reduce el número de parámetros a dos categorías, sensibles y relevantes al contexto, dependiendo del estado del sistema respiratorio del paciente. El sistema utiliza información temporal, en forma de puntos, intervalos y tendencias para obtener descripciones cualitativas de los parámetros usados en los procesos de validación e interpretación de datos y planificación de la terapia. Por último, VIE-VENT está preparado para monitorizar todo el proceso de ventilación, desde la fase inicial, pasando por la fase de ventilación controlada, fase de *weaning* hasta el retorno a la respiración espontánea.

3.9.2 Arquitectura del sistema

En la implementación de VIE-VENT podemos distinguir 5 módulos: (a) extracción de características de la señal, (b) selección de datos, (c) validación de datos, (d) abstracción de datos, y (e) interpretación del estado del paciente y recomendación terapéutica. El flujo de datos entre estos módulos está representado en la Figura 3-11.

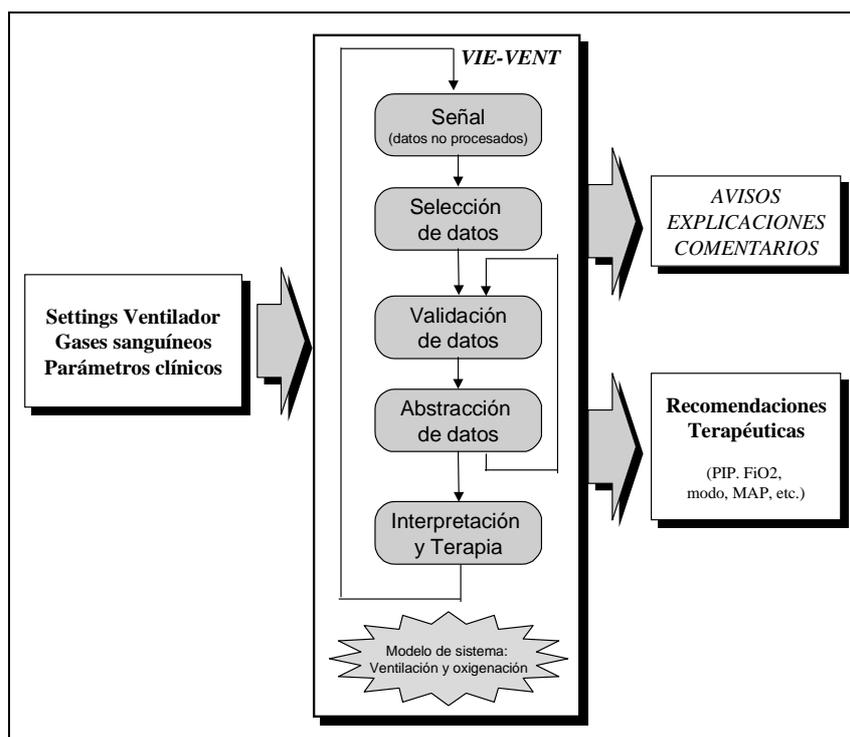


Figura 3-11: Arquitectura de sistema de VIE-VENT

El módulo de extracción de características maneja las tareas de almacenamiento y recuperación de datos y procesamiento de señal. A continuación el módulo de selección de datos filtra los datos relevantes al contexto para su análisis posterior. Los datos son continuos, si se obtienen a partir de la salida del módulo de extracción de características (i.e. *settings* del ventilador, modo de ventilación, gases sanguíneos transcutáneos), y discontinuos si se introducen a petición del sistema (i.e. demografía del paciente, parámetros clínicos, ABG).

Los módulos de validación y abstracción de datos, son dos módulos que operan de forma entrelazada. En un principio, el primero usa los valores numéricos de los parámetros para obtener valores fiables a través del chequeo de medidas plausibles, manejo de datos ausentes y reconocimiento de artefactos. Para ello, se basa en una ontología temporal de forma que primeramente realiza un examen sensible al contexto de la plausibilidad de los datos de entrada y seguidamente aplica métodos de ajuste y reparación para corregir los datos erróneos o ambiguos y obtener una clasificación del dato como correcto, erróneo, desconocido o ajustado. Los métodos de ajuste se han clasificado en cuatro tipos dependiendo de la ontología: basados en puntos de tiempo, basados en intervalos temporales, basados en tendencias e independientes del tiempo.

El módulo de abstracción transforma entonces los datos validados en descripciones cualitativas unificadas. Seguidamente, los valores cualitativos derivados se usan de nuevo en la validación de datos, para detectar medidas incorrectas.

Por último, el módulo de interpretación de datos clasifica el estado respiratorio del paciente basándose en los valores cualitativos unificados de los parámetros y el módulo de planificación de terapia formula acciones terapéuticas basadas en la interpretación de los datos monitorizados, las pule y verifica la efectividad de dichas acciones.

3.9.3 Descripción y representación del conocimiento

El conocimiento representado en VIE-VENT abarca tres áreas principales: datos observados, conocimiento de clasificación y conocimiento dinámico temporal.

Los datos observados son los datos de entradas referidos al paciente. Actualmente y debido al equipo técnico en las modernas UCI, se dispone de gran cantidad de información *on-line*. Además, VIE-VENT cuenta con datos obtenidos de forma discontinua y observaciones cualitativas, necesarios para establecer un cuadro general de la condición del paciente y llevar a cabo un proceso efectivo de razonamiento. Por tanto, el sistema trata con tres tipos de datos: datos cuantitativos continuos, datos cuantitativos discontinuos y datos cualitativos.

El conocimiento de clasificación representa conceptos basados en puntos de tiempo o conceptos independientes del tiempo. En el primer caso, por ejemplo, se llevan a cabo transformaciones de los datos numéricos en regiones cualitativas de interés o se tienen en cuenta dependencias causales y funcionales. En el segundo caso, se establecen clasificaciones entre los datos en función de su fiabilidad y punto de medida.

Por último, el conocimiento temporal dinámico describe la relación de los parámetros en el tiempo, como por ejemplo, la persistencia de valores válidos de parámetros durante un período de tiempo, las esperadas descripciones cualitativas de las tendencias en los parámetros, etc.

3.9.4 Ciclo de ejecución del sistema

Dependiendo del curso del diagnóstico, el potencial de la monitorización y las metas terapéuticas de la ventilación pueden cambiar. El período completo de ventilación artificial se ha dividido en 4 fases: (a) una fase inicial, (b) una fase de ventilación

controlada, (c) una fase de *weaning*, y (d) una fase de retorno a la respiración espontánea. La transición de una a otra se lleva a cabo por medio de reglas que tienen en cuenta la *cantidad* de ventilación artificial del paciente en el momento actual, i.e. los *settings* del ventilador.

Durante la corta fase inicial el objetivo es caracterizar la severidad del diagnóstico y optimizar la expansión de la pared torácica y la saturación de oxígeno. Seguidamente se desarrolla una fase de ventilación controlada, más o menos prolongada dependiendo de la severidad del diagnóstico, en la que el trabajo respiratorio principal lo lleva a cabo el ventilador. En la fase de *weaning* el paciente comparte el esfuerzo de la respiración con el ventilador e incrementa sus niveles de pO_2 en sangre y en la llamada fase de retorno a respiración espontánea comienza a considerarse la posibilidad de la extubación.

3.9.5 Comentario crítico

Una de las características más importantes de VIE-VENT es el mecanismo de abstracción temporal que combina toda la información disponible sobre el estado del sistema respiratorio del paciente. Para ello, los autores han tenido en cuenta los grandes volúmenes de datos que tienen a su disposición el staff médico, datos cuya frecuencia de ocurrencia es diferente y que pueden ser erróneos. Los métodos desarrollados son capaces de manejar conocimiento incompleto del dominio y, a falta de un modelo de función-estructura fiable, se usaron combinaciones de categorías de puntos de tiempo y descripciones cualitativas de tendencias esperadas.

Como resultado del proceso de abstracción temporal, el sistema maneja descripciones cualitativas unificadas que incorporan conocimiento sobre puntos e intervalos, así como tendencias. Dichas descripciones son adecuadas para mejorar el proceso de validación de datos, la interpretación del estado del sistema respiratorio, la formulación de acciones terapéuticas, así como para verificar la efectividad de dichas acciones.

Las mejoras del sistema apuntan a la expansión del modelo de ventilación artificial para combinar representaciones temporales absolutas y relativas. VIE-VENT se intentará integrar en el sistema de gestión de datos del paciente usado en las UCI de neonatos, para conseguir una adquisición de datos on-line de los registros del paciente,

el monitor y el ventilador, lo cual minimizaría la entrada de datos manual. Finalmente será mejorado el módulo de predicción de los efectos de las estrategias terapéuticas a corto y largo plazo y será desarrollado un interfaz de usuario gráfico, más amigable al usuario.

3.10 NÈOGANESH

NèoGanesh es un sistema supervisor en lazo cerrado basado en conocimiento para gestión ventilatoria en la UCI [76].

3.10.1 Objetivos o metas del sistema

La meta principal de NèoGanesh es interpretar datos clínicos en tiempo-real y controlar la asistencia mecánica ventilatoria que se le proporciona a los pacientes de la UCI. En concreto, como sistema inteligente es capaz de: (a) manejar gran cantidad de información en tiempo real sobre el estado del paciente; (b) diagnosticar las situaciones observadas; (c) predecir la evolución del estado del paciente; (d) construir planes de acción y responder ágilmente en casos de emergencia; y (5) ejecutar las acciones planificadas.

Según sus autores, las razones para construir un sistema en lazo cerrado se justifican por el hecho de que el proceso de *weaning* necesita una monitorización constante de los pacientes ventilados, para ir adaptando poco a poco los *settings* del ventilador a la evolución del estado respiratorio del paciente. El sistema es capaz de desarrollar una estrategia terapéutica para reeducar gradualmente los músculos respiratorios del paciente evaluando asimismo su capacidad para respirar sin soporte.

En el contexto de la ventilación mecánica, se diferencian 3 niveles de control, ordenados de forma creciente en función de la complejidad:

- Un primer nivel en el cual se genera la asistencia y se controla directamente el ventilador a través de métodos de teoría clásica de control y modelos matemáticos de sus componentes físicos.
- El siguiente nivel determina el modo de ventilación, monitorizando los parámetros fisiológicos de forma que puedan usarse como variables para el servo-control de un parámetro del ventilador. El control automático de la ventilación se construye sobre modelos fisiológicos del paciente más o

menos complejos usando relaciones matemáticas entre los parámetros fisiológicos.

- El tercer nivel es la adaptación de la asistencia, usando la información para definir el estado actual del paciente y su evolución. Este tipo de tarea la realiza el médico para lo cual se basa en conocimiento médico específico y se dirige por medio de estrategias terapéuticas.

Los autores sostienen que, pudiendo asimilar los dos primeros niveles con tareas de control de bajo nivel, y el tercero con la planificación de alto nivel, es posible integrar una parte de este último nivel en el sistema global que ejecute el diagnóstico, determine la terapia y actúe sobre el ventilador.

3.10.2 Arquitectura del sistema

La arquitectura general del sistema, que aparece en Figura 3-12, está diseñada sobre la base de tres tareas abstractas en razonamiento médico: monitorización, diagnóstico y planificación terapéutica que pueden refinarse en distintas subtareas.

A través del procesamiento de datos, el sistema adquiere y procesa información sobre el estado respiratorio del paciente según tres variables, frecuencia respiratoria, volumen tidal y ETCO₂.

El diagnóstico puede descomponerse en dos subtareas: (1) la subtarea de clasificación de los datos procesados para diagnosticar el estado respiratorio actual del paciente; y (2) la subtarea de abstracción temporal, que evalúa el curso temporal en la evolución del paciente.

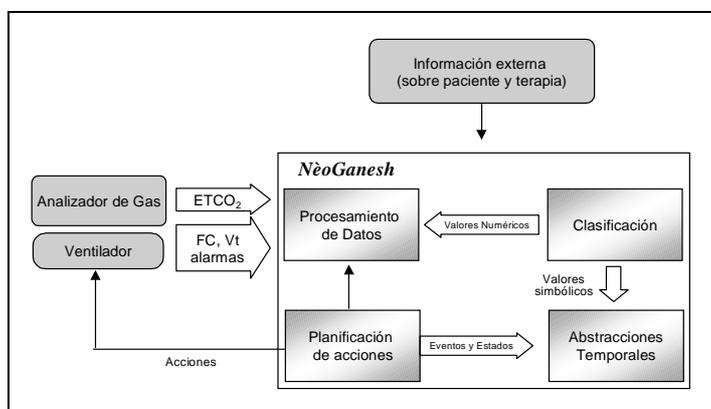


Figura 3-12: Visión general de la arquitectura de NèoGanesh

Finalmente, la subtarea de planificación de acciones determina qué acción terapéutica es necesario ejecutar sobre el ventilador y qué parámetros específicos deben adquirirse, mientras que la abstracción temporal realizaría la comparación entre el estado deseado del paciente, obtenido por la planificación, y el real, diagnosticado por la tarea clasificatoria, con el fin de comprobar las desviaciones producidas y actuar en consecuencia.

La interacción del usuario con el sistema es mínima, tan solo en la etapa de inicialización el médico debe suministrar información relativa al paciente demográfica relativa al paciente así como la terapia prevista.

Todas las tareas en NèoGanesh están asociadas a un agente que tiene capacidades específicas e intercambia información por medio de mensajes. La Figura 3-13 representa el flujo de información entre los agentes en una situación de rutina, esto es, cuando no ocurre ningún evento de emergencia. En este modelo un agente está definido como: (1) un conjunto de tres módulos, el módulo de percepción, el de razonamiento y el de comunicación/acción. y (2) un supervisor que organiza las interacciones entre ellos y adapta la operación del agente a los cambios en el mundo que le rodea. Tanto los módulos como el supervisor se ejecutan concurrentemente e interactúan de forma síncrona.

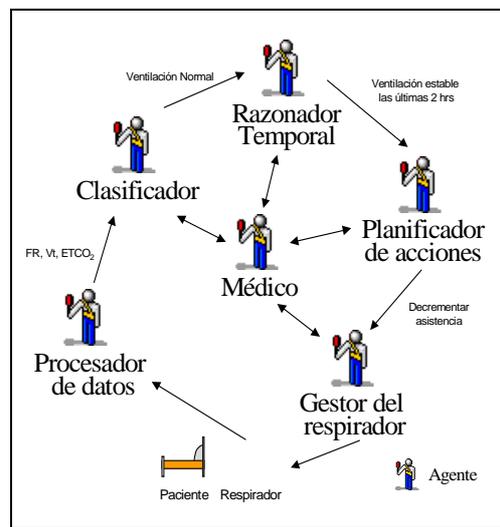


Figura 3-13: Flujo de información entre agentes

Hay que destacar un aspecto importante del modelo como es la comunicación entre los agentes, que se realiza directamente y no a través del uso de ninguna estructura global. Además, cada agente gestiona su propia actividad por medio del supervisor y el

módulo de razonamiento. En el apartado siguiente se analiza la representación del conocimiento utilizada, en la que están separadas las estrategias de control del razonamiento de cada agente del conocimiento del dominio.

3.10.3 Descripción y representación del conocimiento

En NèoGanesh se ha propuesto un modelo de razonamiento temporal que permite representar de una forma explícita los conceptos de tiempo y cambio a la vez que asegura su tratamiento computacional. Los autores dividen el mundo en entidades temporales y atemporales, y dentro de las primeras, definen dos tipos de objetos independientes del dominio, el estado y el evento. Son eventos, por ejemplo, los diagnósticos, las acciones, las alarmas, mientras que los estados distinguen los tipos respiratorio, ventilatorio, etc.

Para razonar sobre objetos temporales, existen dos mecanismos de abstracción: la agregación de situaciones similares y eliminación de información no relevante, redundante u obsoleta. Estas abstracciones permiten la interpretación incremental de observaciones a medida que son adquiridas, y la determinación de la evolución esperada del estado del paciente. A causa de que la percepción de los cambios es dependiente del contexto, estos mecanismos se activan y adaptan dependiendo del contexto.

Para representar la heurística médica, el sistema usa un esquema de representación híbrido entre reglas de producción y programación orientada a objetos. Refinando las inferencias y entidades temporales independientes del dominio, se añade conocimiento específico del dominio para gestionar una terapia clínica. Cada módulo de razonamiento del agente posee su propia base de reglas, en las que la estrategia inferencial es el encadenamiento hacia adelante. Merced a la orientación a objetos, el mecanismo de *tipado* natural permite que emparejar instancias de clases y subclases con variables contenidas en las reglas. De esta forma, la parte de condición y de acción de una regla son dependientes del contexto representado por el conjunto de objetos que encajan en la regla.

En total, el conocimiento incorporado al sistema se organiza en 11 bases de reglas, de las cuales 7 está dedicadas al diagnóstico sobre la ventilación actual y a la definición de la terapia, mientras que el resto lo están a la representación del razonamiento temporal.

3.10.4 Comentario crítico

El sistema actualmente implementado gestiona la ventilación de pacientes con modalidad presión de soporte (PSV), que se usa para pacientes con actividad respiratoria espontánea. Esta limitación ha permitido desarrollar un sistema en bucle cerrado que controla el ventilador sin ninguna intervención del médico. Las ventajas que se esperan de la implantación de dicho sistema están centradas en dos aspectos fundamentales, reducir la duración de la ventilación y reducir la carga de trabajo del médico. Además, el sistema se ha preparado para adaptar la asistencia respiratoria a las necesidades del paciente durante 24 horas diarias, obteniendo buenos resultados en la predicción del *weaning*.

3.11 Resumen

Como se ha visto en los párrafos anteriores, la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial al campo de la monitorización inteligente de pacientes no es un área de investigación de factura reciente. Desde los primeros trabajos de Fagan ya han transcurrido casi 30 años durante los cuales se han resuelto numerosos problemas en el entorno de las Unidades de Cuidados Intensivos, pero han surgido muchos otros, fundamentalmente a consecuencia del desarrollo de la tecnología médica y la evolución del conocimiento clínico.

Una disciplina relativamente joven, como la Inteligencia Artificial, ha encontrado en la Medicina clínica, y en concreto en la ventilación mecánica de pacientes que sufren algún tipo de enfermedad respiratoria, un laboratorio de pruebas perfecto sobre el cual aplicar los métodos y técnicas de resolución de problemas. Al mismo tiempo, la Medicina se ha aprovechado de esta situación y ha contribuido a dotar a estos sistemas de esquemas de razonamiento casi humanos y de conocimiento derivado de la experiencia con lo cual se han convertido en verdaderos asesores clínicos.

Los sistemas de gestión de ventilación mecánica de pacientes que este capítulo repasa se corresponden con dos filosofías de construcción de sistemas inteligentes: (a) especialistas que intentan solucionar problemas clínicos específicos, y (b) arquitecturas generales para monitorización inteligente.

Los primeros son sistemas que utilizan las heurísticas clínicas y posiblemente modelos matemáticos de algunas funciones fisiológicas para desempeñar sus tareas. La

reusabilidad de este tipo de sistemas en otro tipo de contexto es realmente difícil, a menos que se reimplementen ciertos módulos. En esta categoría encajan sistemas como WeanPro, VM, PUFF, ESTER, etc.

Las arquitecturas para monitorización inteligente gozan de las ventajas de la aplicabilidad a la resolución de muchos tipos de problemas merced a su generalidad, sin embargo no prevén a corto plazo la aplicación de los prototipos. En este tipo de sistemas se prima la exploración de nuevas técnicas y conceptos que puedan ser integrados a posteriori y se sacrifica la especificidad por la flexibilidad en la representación del conocimiento y el razonamiento. Debido a su naturaleza *polifacética*, tiene una importancia vital la coordinación de las múltiples herramientas que implementan los distintos niveles cognoscitivos y de razonamiento. En este tipo de sistemas se encuadran arquitecturas como Guardian, Simon, etc.

Entre los principales problemas que tratan de resolver los sistemas descritos, quizás el exceso de información en las Unidades de Cuidados Intensivos sea el objetivo primordial, además como es lógico el cuidado del paciente. El análisis, interpretación e integración de información proveniente de la instrumentación biomédica se ha convertido en uno de los grandes desafíos en el desarrollo de sistemas de monitorización inteligente. La tarea de diagnóstico del personal clínico, y en especial del especialista, se ha visto dificultada en gran medida, y aunque parezca una paradoja, por el desarrollo de monitores de cabecera que incorporan la posibilidad de medir un mayor número de parámetros fisiológicos. Así pues, demasiada información proveniente de los sensores puede ocasionar errores en el diagnóstico, que además tienen que considerar otra serie de datos, como las observaciones clínicas, la historia reciente del paciente, las pruebas de laboratorio, etc. Si consideramos la gravedad del estado de los enfermos que ingresa en este tipo de unidades y la rapidez con la que es necesario actuar ante situaciones de riesgo, puede comprenderse la necesidad de sistemas que *resuman* de algún modo inteligente esta información.

Otros aspectos que el desarrollo de sistemas de monitorización inteligente debe considerar es la naturaleza dinámica del proceso, para determinar el tipo de medidas a efectuar y el significado de los patrones temporales; la contextualización del proceso de interpretación respecto al tipo de paciente considerado y a su sintomatología, para dotar del significado correcto a las variables monitorizadas; y la incorporación de

conocimiento a módulos de diagnóstico, que permitan detectar las situaciones clínicas, sobre todo las que requieran una acción inmediata, y a módulos de terapia que aconsejen al clínico en su labor. Todo ello permitirá aumentar la eficiencia de la asistencia clínica, mejorando el cuidado del paciente y minimizando el coste hospitalario.

4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

No hay nada más difícil de llevar a cabo, más peligroso de realizar o de éxito más incierto que tomar el liderazgo en la introducción de un nuevo orden de cosas.
(Maquiavelo)

4.1 Introducción

Durante el último cuarto de siglo, los sistemas informáticos han introducido un nuevo orden. Aunque la tecnología ha conseguido grandes avances desde que Maquiavelo hizo sus previsiones, todavía sus palabras llevan algo de verdad.

El desarrollo de cualquier proyecto software que trate de construir un sistema informático con calidad debe enmarcarse dentro de la ingeniería del software. Según el IEEE, la ingeniería del software es *la aplicación de un enfoque sistemático, disciplinado y cuantificable hacia el desarrollo, operación y mantenimiento del software; es decir, la aplicación de ingeniería al software* [77]. La ingeniería del software ocurre como consecuencia de un proceso denominado *ingeniería de sistemas* que, en lugar de concentrar sus esfuerzos en el software, se concentra en una amplia variedad de elementos, analizando, diseñando y organizando esos elementos en un sistema, en un producto, un servicio o una tecnología para la transformación o el control de la información. El papel del ingeniero de sistemas es definir los elementos de un sistema informático específico en el contexto de la jerarquía global de un sistema mayor que lo englobe [78].

Independientemente del dominio de enfoque, la ingeniería de sistemas comprende una colección de métodos para navegar en una jerarquía de niveles, donde el más alto corresponde a la visión global del negocio o del producto para establecer el contexto adecuado, y los más bajos se corresponden con refinamientos de la visión global para enfocarse en un dominio de interés específico. Dentro de ese dominio deberán analizarse las necesidades de los elementos del sistema (i.e. información, software, hardware, usuarios, ...), para finalmente iniciar el análisis, diseño y construcción del elemento deseado del sistema.

La meta de la ingeniería del software es definir arquitecturas que permitan a las empresas (en este caso, el sistema hospitalario) emplear la información eficazmente. Tomando como referencia los objetivos o metas del negocio en cuestión se deben analizar y diseñar tres arquitecturas diferentes: (1) *la arquitectura de datos*, o estructura para las necesidades de información del negocio, (2) *la arquitectura de aplicación*, es decir, aquellos elementos del sistema que transforman objetos de la arquitectura de datos de acuerdo con algún propósito, y (3) *la infraestructura tecnológica*, que comprende el hardware y el software empleados para dar soporte a las aplicaciones y a los datos.

Para modelar las arquitecturas descritas, el ingeniero define una jerarquía de actividades. En primer lugar, debe adquirir una visión global del sistema y de otros sistemas que lo contengan, identificando dominios, objetos de datos visibles a nivel del negocio, sus relaciones y cómo fluyen entre los dominios del negocio. A continuación, el análisis de requisitos se ocupa de identificar en detalle la información y los requisitos de las funciones del dominio de interés, es decir, especifica qué se requiere en un área determinada. En este nivel se definen objetos de datos, relaciones y flujos de información delimitados por el área de análisis. El resultado de esta fase es definir en qué aspectos el sistema informático puede prestar soporte. En la fase de diseño, se modelizan los requisitos básicos del sistema de información específico y se traducen en una arquitectura de datos, una arquitectura de aplicación y una infraestructura tecnológica. Como paso final, la construcción e integración se concentra en los detalles de la implementación, construyendo una base de datos apropiada y las aplicaciones y estructuras internas de datos que lleven a cabo las tareas para las cuales han sido diseñadas.

4.2 Objetivos del sistema

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un sistema de monitorización inteligente capaz de gestionar las situaciones clínicas que se presentan en los pacientes ingresados en Unidades de Cuidados Intensivos que reciben soporte ventilatorio mecánico y sobre los cuales el médico realiza tareas de supervisión con el fin de restituir la condición respiratoria satisfactoria y eliminar la asistencia. El sistema debe controlar el bienestar del paciente, estableciendo diagnósticos basados en la integración de información proveniente de múltiples fuentes de datos. Ante la aparición de

complicaciones, el sistema operará de forma que no ponga en peligro la vida del enfermo y, en todo caso, advertirá al usuario de la situación mediante alarmas inteligentes. Como tarea complementaria, ejercerá funciones de asesor médico, aconsejando al usuario más cualificado una determinada terapia ventilatoria basada en las evidencias disponibles sobre el enfermo. En cualquier caso, el sistema no actuará *motu proprio* sobre la terapia ventilatoria, relegando dicha responsabilidad al clínico encargado del caso.

Más allá del objetivo clínico, el proyecto está centrado en la construcción de un sistema de información para una gestión clínica que lleve a cabo las tareas clásicas de adquisición, almacenamiento, recuperación y comunicación de datos, tradicionalmente no integradas en un sistema único. Dichas tareas son manualmente ejecutadas, en el peor de los casos, por personal clínico reduciendo el tiempo dedicado al cuidado del enfermo. Este sistema trata de minimizar el tiempo dedicado a aspectos rutinarios del tratamiento de la información, que involucran soportes físicos como el papel, y cuya fiabilidad está muy condicionada por el factor humano.

<i>Objetivos Clínicos</i>	Diseño de un sistema de monitorización inteligente para pacientes UCI con asistencia ventilatoria mecánica
<i>Objetivos de Implementación</i>	Sistema de información para la gestión clínica (adquisición, almacenamiento, recuperación y comunicación de datos)

4.3 Establecimiento de Requisitos

4.3.1 Entorno de aplicación

La organización de un sistema hospitalario aparece representada en la Figura 4-1 [79]. El área más interior involucra todas aquellas actividades de evaluación de observaciones y resultados de las pruebas complementarias para la formulación de decisiones clínicas. A continuación, el área de administración clínica lleva a cabo tareas como la organización de las consultas, los análisis, la correspondencia clínica, el archivo y la auditoría clínica. El área de servicios clínicos integra todos aquellos servicios generales, terapéuticos y de investigación que proporcionan los laboratorios, las unidades especializadas de RMN o TAC, las áreas de terapia, salas de operaciones, departamentos de suministros, transportes, etc. Por último, la gestión general del entorno asistencial está compuesto por los gerentes de hospital, administradores financieros, aseguradoras médicas y autoridades sanitarias.

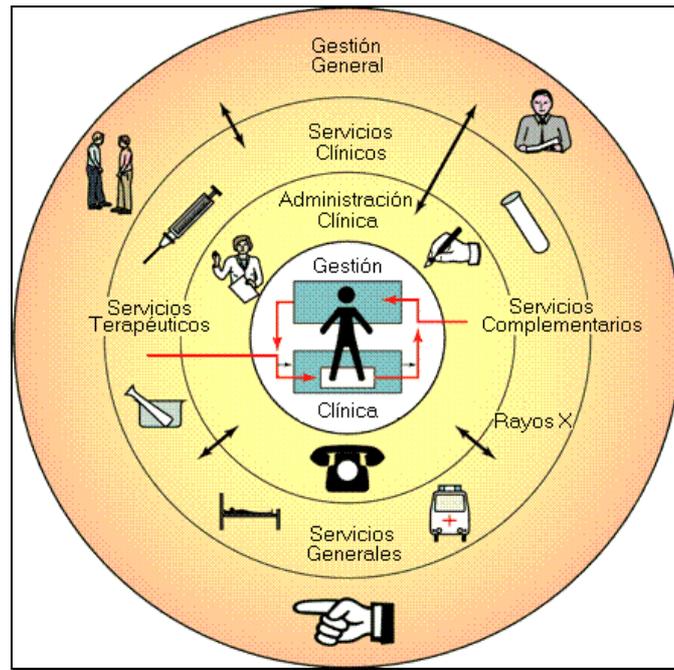


Figura 4-1: Niveles organizativos de un hospital

Cualquier desarrollo informático que tenga como objetivo dar soporte a alguna de las actividades mencionadas deberá tener en cuenta la organización existente del trabajo, además de las interacciones con el resto de unidades hospitalarias, en especial con otros sistemas de información ya instalados, y con los cuales sea necesario intercambiar datos. El entorno UCI típico se circunscribe a un círculo mucho más pequeño de personal y áreas implicadas, personal clínico, laboratorio, instrumentación e historia clínica, tal y como se representa en la Figura 4-2.

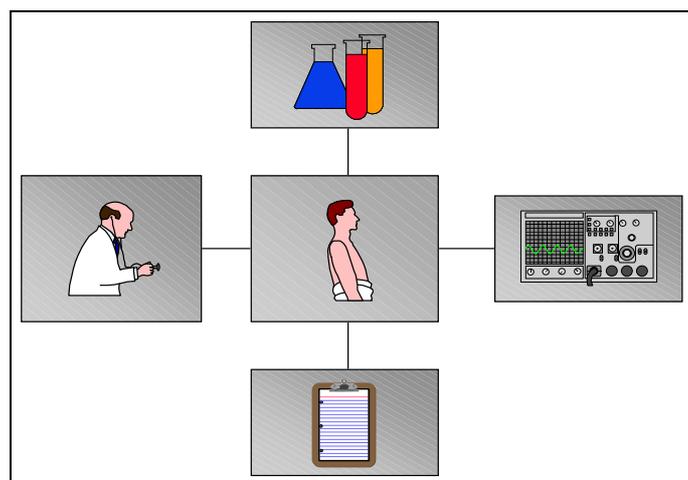


Figura 4-2: Elementos fundamentales en un entorno UCI

4.3.2 Necesidad del sistema

El personal clínico directamente implicado en el cuidado de pacientes UCI son médicos y enfermeras. El médico es el supervisor global, encargado de obtener diagnósticos a partir de todos los datos del paciente suministrados y de realizar ajustes en el proceso de monitorización si el paciente no responde como se espera al tratamiento prescrito. Las enfermeras son las encargadas de mantener la estabilidad del paciente ejecutando las directrices que el médico propone y realizan tareas rutinarias de manejo de instrumentación y actuación sobre dispositivos de soporte de vida, como podría ser una unidad de asistencia ventilatoria artificial.

Un estudio elaborado por la Universidad de Aachen demuestra que una enfermera emplea el 30 por ciento de su tiempo conservando al día la documentación y que durante una visita un médico normalmente invierte hasta un 50 por ciento de su tiempo evaluando y actualizando la documentación [80]. La distribución de tareas y los porcentajes de tiempo que ocupan se muestra en la Figura 4-3.

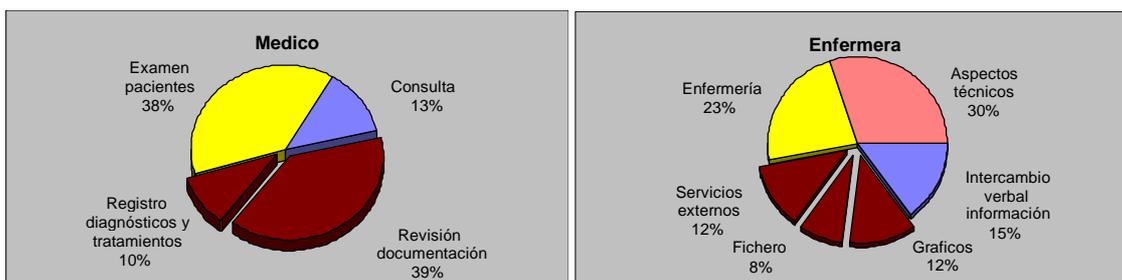


Figura 4-3 : Distribución del trabajo rutinario en una Unidad de Cuidados Intensivos

Además, a medida que se desarrolla la tecnología, es posible obtener más datos de parámetros fisiológicos, con lo cual la tarea de diagnóstico del clínico se ve beneficiada por un lado y perjudicada por el otro. Aunque en principio podría parecer que el juicio clínico del médico pueda basarse en un mayor número de datos, con el fin de contrastar sus observaciones, no es menos cierto que tal avalancha de información puede provocar un efecto contrario y le impida retener los datos realmente importantes. Si a esto se le añade la posibilidad de que ciertas alarmas se activen ante situaciones de emergencia, podemos valorar la presencia de un sistema de información que recoja, analice e interprete los datos del paciente (gestión), controlando su estado clínico y actuando sobre la instrumentación a requerimiento del médico (supervisión).

Por todo ello, un sistema de información en entornos UCI debe poseer cualidades para la monitorización y gestión de enfermos, en este caso recibiendo asistencia ventilatoria mecánica, así como funciones para la gestión de la información recogida del entorno médico-asistencial e instrumental y servir como herramienta de ayuda cuando el clínico deba tomar decisiones para mejorar el estado del paciente.

4.3.3 Descripción funcional

Una vez analizado el entorno de proceso y delimitadas las necesidades básicas que debe cubrir el sistema construido, podemos definir el contexto de funcionamiento. En la Figura 4-4 podemos ver una aproximación a la arquitectura lógica del sistema, incluyendo entradas y salidas de información así como interfaces y puntos de acceso a la información.

Las fuentes de datos típicas en las Unidades de Cuidados Intensivos podrían dividirse en tres tipos: las procedentes de la instrumentación, los resultados de pruebas de laboratorio y los datos resultantes de una consulta médica. El proceso de consulta médica a que se refiere la Figura 4-4 ocurre no sólo al comienzo del seguimiento, sino cada vez que se realiza una visita pie de cama. En ella se obtienen, como se mencionaba en el Capítulo 2, signos, síntomas, observaciones visuales e hipótesis a priori sobre el estado del enfermo, teorías que luego el médico valora y contrasta con el resto de evidencias. La instrumentación conectada al paciente proporciona datos de forma continua de los parámetros fisiológicos fundamentales, cuyos períodos de latencia o validez son muy pequeños, mientras que los resultados de laboratorio se refieren a parámetros con períodos de latencia mayores, como los análisis de sangre. El proceso de monitorización que lleva a cabo PATRICIA permite al clínico obtener clasificaciones diagnósticas así como sugerencias de cómo afrontar la terapia. Además, y como sistema de gestión de datos, facilita las tareas de visualización, almacenamiento y recuperación de datos al resto de personal clínico. De esta forma, PATRICIA es un medio de canalizar, aglutinar e integrar la información, procesarla y servir como asesor clínico.



Figura 4-4: Diagrama de contexto de la arquitectura del sistema

4.3.4 Requisitos No Funcionales

Las necesidades del usuario con respecto al sistema han obligado a considerar una serie de requisitos no directamente implicados con la tarea de monitorización. Los tiempos de respuesta del sistema de información deben adecuarse a las restricciones impuestas por la interacción con el equipamiento biomédico, y a las implicaciones temporales de los datos que éstos suministran. No en vano, la tarea de monitorización lleva consigo la adquisición no secuencial de información, que se adapta según las necesidades del caso clínico. De esta forma, el comportamiento del sistema debe emular el comportamiento del clínico, recogiendo datos con mayor frecuencia cuanto mayor sea la gravedad del estado del paciente. Sin embargo, esto no significa que deba sobrecargarse de información ya que, como se describía antes, éste era uno de los problemas más comunes de los entornos actuales.

La naturaleza del proceso de monitorización, sus características de supervisión y control, y la consecuente división de tareas del personal clínico encargado, obligan a que el sistema deba adaptarse al puesto de trabajo para el cual ha sido diseñado. En concreto, hay que tener en cuenta el tipo de usuario que va a interactuar con el sistema y adecuar el contenido informacional si es una enfermera la que accede a los datos, o si por el contrario es el médico. Así, se pueden distinguir dos puntos de acceso a la información, tal y como aparecen esbozados en la Figura 4-4. El punto central, o control

del sistema, que presenta toda la información relativa al paciente en cuanto a procesamiento de datos numéricos e interpretaciones inteligentes, debe permitir sólo el acceso a la información y la actuación sobre el proceso de monitorización de los clínicos más experimentados. Como contrapartida, y a pie de cama, se crean puntos locales de acceso, destinados a la visualización concisa de los datos fisiológicos del paciente, de forma que la enfermera tenga la posibilidad de supervisar el estado del paciente.

Un aspecto que es necesario considerar es la interacción con otros sistemas, lo cual condiciona el posterior diseño del sistema. En lo que concierne a la adquisición de datos, anteriormente se ha mencionado la dificultad existente en la interconexión de dispositivos médicos ante la falta de un estándar. Sin embargo, son bastantes los esfuerzos que se están llevando a cabo para la definición y adopción de un protocolo de intercambio de datos común. Por ello, la comunicación con dispositivos biomédicos debe realizarse adoptando el protocolo del caso particular, y diseñando una interfaz entre el sistema global y la instrumentación, de forma que llegado el caso, la tarea de actualización de la capa de comunicación suponga un coste mínimo. La interacción con otro tipo de sistemas, como pudiera ser un sistema de información hospitalario, o quizás otras unidades, como laboratorios, debiera apoyarse en procedimientos estandarizados de comunicación, lo cual ya ha sido previsto en el desarrollo actual.

Por último, y limitando el análisis al problema ventilatorio, hay que mencionar las restricciones impuestas por los aspectos legales que implica el proceso de monitorización, y por extensión el problema de la toma de decisión clínica cuando ésta es llevada a cabo sin la intervención del médico. En el Capítulo 3 se han descrito algunos sistemas de monitorización para la gestión ventilatoria de pacientes. Si bien algunos restringían su autonomía en la actuación a ciertas situaciones, en este desarrollo no se ha considerado la posibilidad de funcionamiento del sistema sin intervención humana. La parte inteligente del sistema debe comportarse como una herramienta de ayuda, facilitando la labor del médico, pero nunca sustituyéndolo.

4.4 Diseño del sistema

El diseño es el primer paso en la fase de desarrollo de cualquier producto o sistema. Es el proceso de aplicar distintas técnicas y principios con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle como para permitir

su realización física [78] y supone la primera de las tres actividades técnicas —diseño, codificación y prueba— necesarias para construir y verificar el software.

En apartados anteriores se han analizado todos los requisitos que imponen tanto el propio proceso en sí, como el entorno donde el sistema va a ser instalado. Cumplir estas restricciones supone facilitar la tarea de diseño y reducir en lo posible los ciclos de reingeniería. Además, la modularidad es un principio básico que subyace en la estructura de PATRICIA, y de esta forma es posible el desarrollo paralelo de los diferentes subsistemas, su validación y verificación y posteriores tareas de mantenimiento y actualización.

4.4.1 Perspectiva general

En el entorno de Unidades de Cuidados Intensivos, la tarea de monitorización inteligente puede ser considerada como un proceso cíclico que involucra: (1) adquisición de información y datos, (2) interpretación de la información y de los datos en el contexto específico del paciente, (3) establecimiento de diagnósticos de acuerdo con el estado fisiopatológico del paciente, y (4) prescripción de directrices terapéuticas para predecir situaciones indeseables y optimizar la condición del paciente [44].

Existen una serie de problemas en esta aproximación cíclica. En primer lugar, los datos y la información clínica normalmente provienen de diferentes fuentes. Algunos parámetros se obtienen directamente de los instrumentos conectados al paciente, mientras que otros parámetros proceden de análisis de laboratorio que normalmente se realizan "off-line".

En segundo lugar, existen también aspectos temporales que los sistemas de monitorización inteligentes deben considerar para realizar sus tareas de forma adecuada. Por ejemplo, en la UCI la adquisición de datos no es siempre secuencial. Más aún, la relevancia de un parámetro dado no tiene por qué ser siempre la misma. Por ello, es difícil configurar un proceso de supervisión cíclica en el cual la relevancia de los parámetros varía con el tiempo. Sin embargo, la estrategia de control temporal desarrollada soluciona muchos de los problemas que el manejo de información temporal plantea. Además, el componente de conocimiento del sistema agrupa los objetos del dominio en base a su persistencia temporal.

Un tercer problema concierne a la tarea interpretativa. En la UCI, cada medida debe ser interpretada en el contexto del caso clínico particular. Las peculiaridades físicas de cada paciente (i.e. su "idiosincrasia"), es el elemento del complejo paciente-instrumento que debe ser utilizado para la interpretación semántica de los valores numéricos de una determinada variable monitorizada. Este proceso de interpretación semántica no es necesariamente inferencial, y el significado de cada dato numérico debe aparecer espontáneamente cuando el parámetro correspondiente es considerado en el *contexto natural* del paciente específico [82]. Por ello, el sistema separa las interpretaciones de la significación del parámetro y del estado global del paciente después de considerar todos los parámetros. Así, es posible tener un solo componente de conocimiento para la parte inteligente que es *adaptable* a cada paciente interpretando la significación de las variables considerando las peculiaridades físicas del paciente [81].

4.4.2 Estructura Modular Propuesta

De acuerdo con el análisis funcional y de requisitos previo, el diseño arquitectónico propuesto para PATRICIA cuenta con tres módulos de proceso [44].

El primer módulo, *módulo determinístico*, se ocupa de las siguientes tareas: (1) planificar y realizar la adquisición de los datos e información relevante, (2) realizar un análisis preliminar de las entradas numéricas para detectar posibles errores en los instrumentos, y (3) asignar interpretaciones clínicas a los parámetros numéricos, teniendo en cuenta las peculiaridades de cada caso en particular.

Por otro lado, el segundo módulo, *módulo heurístico*, se dedica a: (1) establecer los diagnósticos globales utilizando la información semántica que suministra el módulo determinístico, y (2) prescribir directivas terapéuticas de acuerdo con la condición fisiopatológica del paciente.

Con el fin de obtener una adecuada representación de las restricciones temporales en el entorno de las Unidades de Cuidados Intensivos, PATRICIA incorpora una estrategia de control temporal que: (1) prioriza las diferentes tareas de monitorización, (2) optimiza la adquisición de la información, y (3) reorganiza, si fuera necesario, el proceso de supervisión en función de los resultados obtenidos tanto por el módulo determinístico como por el heurístico.

Así pues, se puede ver que el sistema trata de separar los aspectos relacionados con la adquisición de datos y análisis numérico, un proceso determinista, de los contemplados en el manejo inteligente de la información simbólica, un proceso heurístico, y por supuesto de los que implica un proceso temporal, de ahí la división que se menciona.

4.4.3 Interrelación modular

Las interacciones que tienen lugar entre los módulos lógicos de PATRICIA y el entorno aparecen representadas en la Figura 4-5. Las entradas de datos al módulo determinístico son de dos tipos. Por un lado, la instrumentación biomédica aporta entradas numéricas al sistema, es decir, los parámetros fisiológicos y por otro, el paciente suministra datos demográficos que le sirven al módulo determinístico para contextualizar la interpretación de las variables numéricas.

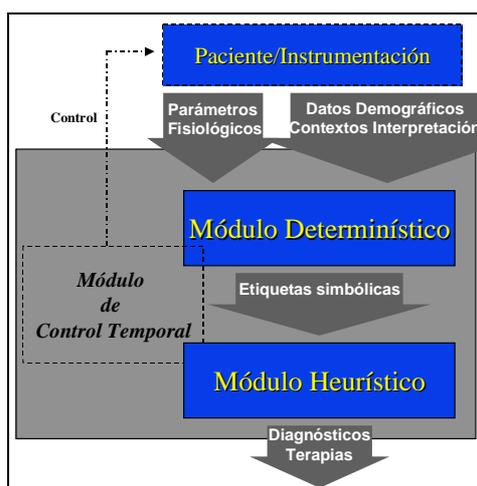


Figura 4-5: Interacción entre los módulos lógicos de PATRICIA

Seguidamente, e interaccionando con el módulo determinístico, aparece el módulo de control que se encarga de actualizar la tarea de muestreo de datos en función de las clasificaciones simbólicas obtenidas por aquél y de las estrategias de monitorización en uso. Es decir, dependiendo de la severidad del caso clínico y de los límites fijados para cada variable monitorizada, el módulo reorganizará la adquisición de nuevos valores.

Por último, la información simbólica de salida del módulo determinístico se utiliza en la parte inteligente del sistema, el módulo heurístico, para elaborar diagnósticos y terapias adaptadas al caso clínico merced a la contextualización previa de la información simbólica.

4.4.4 Descripción de los subsistemas

Después de estas consideraciones previas, a continuación se describe detalladamente cada módulo, haciendo hincapié en el tipo de servicio que proporciona y los algoritmos que lo implementa, subsistemas si existen, interfaces, estructuras lógicas de datos y restricciones de diseño..

4.4.4.1 Módulo Determinístico

El módulo determinístico es el elemento encargado de efectuar la adquisición de todos los datos necesarios para la monitorización sobre el paciente y de realizar el preprocesado simbólico de las variables fisiológicas de interés. En este contexto se puede considerar que el paciente forma parte de una estructura compleja en la cual la *instrumentación* y la *idiosincrasia* particular del paciente contribuyen a caracterizar el sistema físico bajo consideración [44]. De esta forma, el complejo *paciente-instrumentación* se define como un único objeto constituido a su vez por tres subsistemas: (1) variables fisiológicas del paciente, (2) contexto particular del paciente, y (3) instrumentación utilizada para la obtención de las medidas fisiológicas. Esta situación aparece representada en la Figura 4-6 donde además se esbozan las interacciones entre los subsistemas. Todas las acciones y sugerencias que conciernen a este complejo paciente-instrumentación deben orientarse a la corrección y prevención de situaciones indeseables que afectan a todos o a parte de los subsistemas que lo componen.

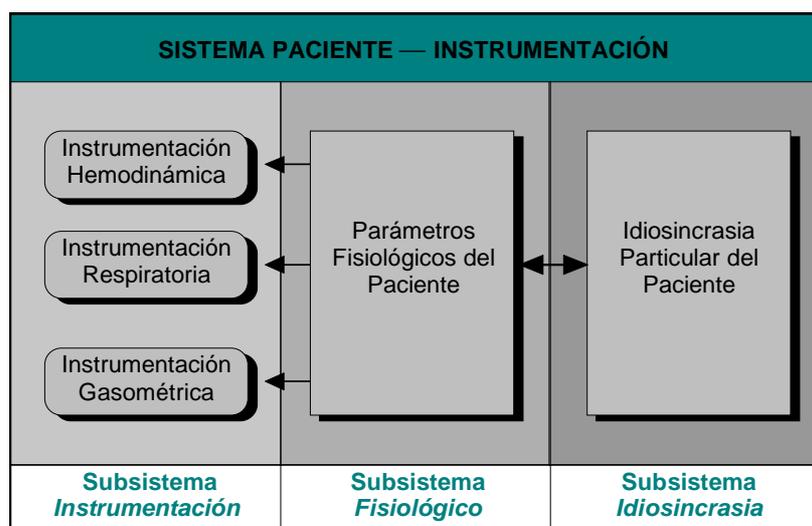


Figura 4-6: Entidades relevantes del sistema *paciente-instrumentación* en la UCI

Parámetros del paciente

Para la determinación del estado fisiopatológico global del enfermo el sistema debe evaluar conjuntamente una serie de variables agrupadas en tres categorías como se indica en la Figura 4-7: (1) parámetros gasométricos, (2) parámetros hemodinámicos y (3) parámetros respiratorios.

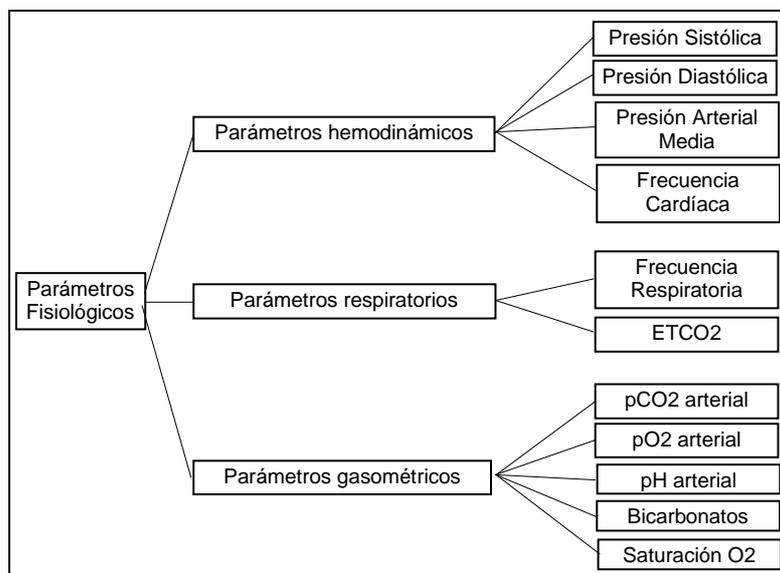


Figura 4-7: Categorías de parámetros del paciente

En la primera categoría se encuadran las variables que determinan el grado de equilibrio metabólico del paciente, una indicación del estado de la función respiratoria, en especial la eficiencia del intercambio gaseoso de CO₂ y O₂. Estos datos se obtienen a partir de pruebas de laboratorio sobre muestras de sangre del paciente. La frecuencia de adquisición depende del estado del paciente, pudiendo alternarse tiempos de 15 a 30 minutos en el comienzo del proceso del destete hasta períodos de un día, en caso de estabilidad del paciente.

Como segunda categoría se encuentran los parámetros hemodinámicos y cardíacos. Este tipo de valores determinan criterios de estabilidad importantes para que el proceso de weaning pueda tener lugar, y se obtienen a partir de monitores conectados al paciente.

Por último, los parámetros respiratorios informan de la capacidad del sistema respiratorio del enfermo para llevar a cabo su tarea de forma autónoma o, por contra, de la necesidad de una ayuda mecánica.

Una vez determinado el estado global del enfermo, es necesario considerar si el paciente recibe o no asistencia ventilatoria, con el fin de ajustar los parámetros ventilatorios y oxigenatorios, que se muestran en la Figura 4-8. Sin embargo, dicha tarea forma parte de la terapia sobre el enfermo y de ella se encarga el módulo heurístico.

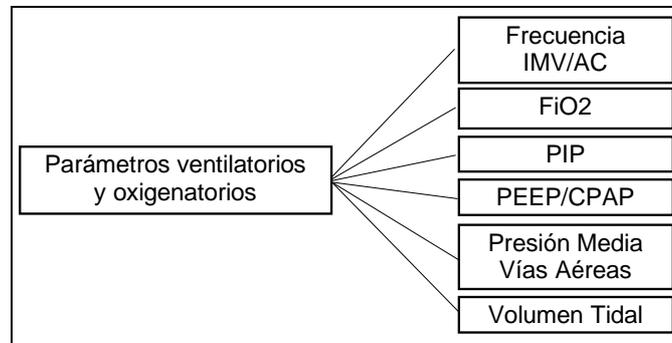


Figura 4-8: Parámetros de ventilación y oxigenación

Diseño de la Arquitectura

La arquitectura del módulo determinístico, que se muestra en la Figura 4-9, se organiza en torno a tres subsistemas: (1) módulo de adquisición de datos, (2) módulo de preprocesado simbólico y, (3) módulo de control. La Figura 4-9 muestra dichos componentes así como el flujo de información que se establece entre ellos.

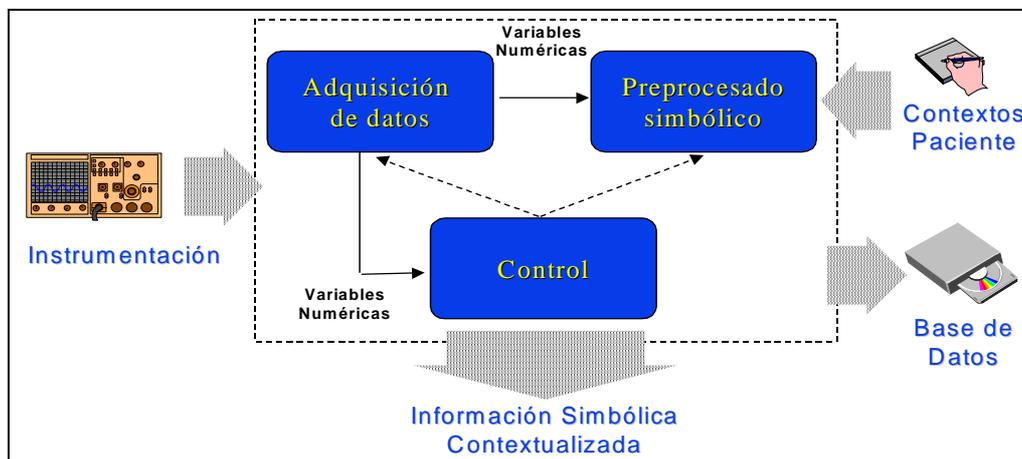


Figura 4-9: Organización del módulo determinístico

El módulo de adquisición de datos es responsable del establecimiento y la configuración de la comunicación con la instrumentación conectada al paciente, realizando análisis preliminares de la información numérica para la detección de artefactos.

El módulo de preprocesado simbólico clasifica la información numérica obtenida por la parte de adquisición seleccionando las etiquetas simbólicas correspondientes en función del contexto dado. El resultado final es la traducción de los valores numéricos en literales que resuman, mediante un único elemento semántico, número y contexto.

El módulo de control es el elemento que coordina el modo de operación del resto de módulos del sistema. Controla el intervalo de adquisición de los valores de las variables en función del estado del paciente, y realiza un seguimiento de sus tendencias. Además es responsable del almacenamiento en la base de datos. Como asistente en la tarea de preprocesado, se encarga de seleccionar el contexto de interpretación adecuado.

Contexto de Interpretación

Para explicar el modo de operación del módulo de preprocesado simbólico es necesario definir el concepto de *contextualización*. Bajo el nombre de *contextos naturales* se agrupan aquellas características del paciente que pueden modificar el significado clínico de alguno o de todos los parámetros fisiológicos del paciente [82].

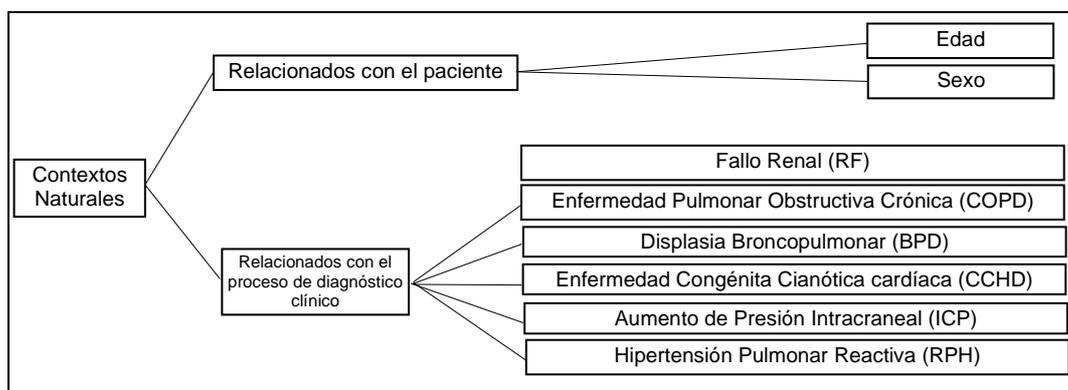


Figura 4-10: Contextos naturales en el procesado simbólico

Los *contextos naturales*, representados en la Figura 4-10, son aquellas condiciones y procesos fisiológicos conocidos que pueden alterar el balance ácido-base, la oxigenación o la hemodinámica. Para facilitar la descripción se han contemplado tres categorías de paciente, adulto, niño y neonato, sobre las cuales se manifiestan o no dichos contextos. Esta división junto con los contextos asignados aparece en la Tabla 4-1.

<i>Categoría Paciente</i>	<i>Contextos</i>
<i>Adultos</i>	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (COPD) Fallo Renal (RF)
<i>Niños</i>	Fallo Renal (RF) Displasia Broncopulmonar (BPD) Enfermedad Cardíaca Cianótica Congestiva (CCHD)
<i>Neonatos</i>	Enfermedad Cardíaca Cianótica Congestiva (CCHD)
<i>Adulto/Neonato/Niño</i>	Hipertensión Pulmonar Reactiva (RPH) Aumento de Presión Intracraneal (ICP)

Tabla 4-1: División por categorías de paciente de los contextos naturales

La clasificación simbólica de los correspondientes parámetros numéricos debe efectuarse considerando no sólo el propio valor numérico de la variable afectada sino también el correspondiente contexto natural.

Así pues, el módulo determinístico utiliza los contextos naturales para interpretar los valores numéricos de los parámetros monitorizados, y establece una serie de rangos de aceptabilidad de valores específicos para cada una de las variables monitorizadas en función del contexto aplicado. Estos rangos se obtuvieron a través de un conjunto de entrevistas estructuradas por medio de las cuales los clínicos fueron interrogados acerca de los límites esperados para todas y cada una de las variables del sistema, de acuerdo con situaciones fisiopatológicas específicas en cada caso.

	<i>pCO₂ (mmHg)</i>		<i>pH</i>	
<i>Contexto</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>
<i>COPD</i>	45	55	7.3	7.4
<i>ICP</i>	20	30	7.5	7.6

Tabla 4-2: Asignación de rangos para las variables pCO₂ y pH en una situación clínica

La presencia de un determinado contexto en una categoría de paciente específica puede provocar la aparición de un conflicto a la hora de determinar qué criterios hay que aplicar sobre una variable dada. Esta situación se resuelve aplicando los criterios de la categoría más restrictiva, es decir, aquella que determine la situación clínica de mayor severidad, tal y como se ve en la Tabla 4-2 (i.e., un aumento de presión intracraneal ICP en un adulto bronquítico COPD, indica un conflicto en la asignación de rangos para las

variables pCO₂ y pH; la situación más restrictiva es la primera, por lo tanto los rangos asociados a esta situación prevalecen).

Aproximaciones al Preprocesado Simbólico

Para la tarea de clasificación de valores numéricos y su conversión en valores simbólicos se intentaron tres aproximaciones que a continuación se detallan.

En una primera aproximación, de tipo categórica y no matizada, se trató de implementar un algoritmo categórico en el cual la clasificación simbólica se efectuase considerando los valores estándar de la literatura de normalidad y anormalidad para las variables implicadas [83]. Dichos valores se ordenaron en una matriz de rangos asociando a cada uno una etiqueta semántica indicativa del significado simbólico del dato. Un ejemplo puede verse en la Tabla 4-3.

<i>Variable: Presión Arterial Sistólica</i>	
<i>Rango</i>	<i>Etiqueta lingüística</i>
> 145	Anormalmente alto
[105,145]	Aceptable
< 105	Anormalmente bajo

Tabla 4-3: Criterios de conversión numérico-simbólica de tipo categórica y no matizada

Esta primera aproximación, apropiada desde una perspectiva computacional tanto a nivel de implementación como a nivel de eficiencia, no resulta práctica por diversos motivos. En primer lugar, se ignoran ciertas características específicas intrínsecas del paciente en concreto (contextos naturales o idiosincrasia particular: edad, peso, etc.). Tampoco considera desviaciones de los rangos y criterios estándar debidos al proceso fisiopatológico del paciente, medicación y otros factores que pueden alterar dinámicamente el establecimiento de rangos apropiados (contextos inferenciales). Por último, una aproximación categórica es obvio que no permite el trabajo con elementos semánticos imprecisos ni con matices lingüísticos usualmente empleados en la terminología clínica.

Por este motivo, se decidió una segunda aproximación en la cual parte de los ya comentados contextos naturales (edad, peso y sexo), fueron considerados a la hora de establecer los criterios para la asignación de literales. En esta nueva aproximación, los

critérios han sido también derivados de la literatura, y se puede ver un ejemplo en la Tabla 4-4.

Variable: Presión Arterial Sistólica (Edad = 45 Sexo = Hombre)	
Rango	Etiqueta lingüística
> 135	Anormalmente alto
[100,135]	Aceptable
< 100	Anormalmente bajo

Tabla 4-4: Criterio de conversión numérico-simbólica de tipo categórica dependiente del contexto

Esta nueva aproximación mejora considerablemente los resultados anteriores, pero adolece todavía de la imposibilidad de tratar elementos sutiles del lenguaje. Para ello es necesario adaptar los rangos al caso específico que se está analizando y, por otra, manipular de forma conveniente y eficaz la terminología lingüística imprecisa.

Al respecto, considérese como hipótesis de trabajo razonable que todos los valores numéricos de un determinado parámetro puedan ser simbólicamente representadas en el espacio semántico *muy alto—muy bajo*. En este contexto, hay varios autores que afirman que la máxima incertidumbre semántica viene dada por nueve categorías lingüísticas. Por tanto, en esta aproximación, para cada parámetro, se pueden definir las categorías *muy_alto*, *bastante_alto*, *alto*, *ligeramente_alto*, *normal*, *ligeramente_bajo*, *bajo*, *bastante_bajo* y *muy_bajo*. Para un paciente determinado, y en un momento determinado, el valor de un parámetro puede ser, por ejemplo, *bastante_bajo*. Aunque cualquier otra asignación de elementos literales podría ser útil, hay que asumir que una segmentación del espacio semántico en más de nueve categorías no es conveniente. Por el contrario, una división menor podría ser perfectamente válida. Estos nueve literales definen el conjunto semántico Σ .

Un procedimiento utilizado para la clasificación simbólica de valores numéricos consiste en el establecimiento de un valor ideal y de dos límites, superior e inferior, entre los cuales puede considerarse aceptable el correspondiente parámetro monitorizado. Evidentemente, cada valor ideal para un mismo parámetro puede ser diferente dependiendo del caso clínico analizado (e.g. los valores aceptables para la presión arterial dependen de la edad del paciente). De manera similar la tolerancia o

rango de variación permitido en relación al parámetro investigado depende del propio parámetro (e.g. la presión arterial admite una mayor tolerancia que el pH arterial), y del caso clínico que está siendo investigado (la tolerancia para la presión arterial de un paciente del que se sabe que es hemodinámicamente estable es obviamente menor que la tolerancia definida para la presión arterial de un paciente del que se sabe que es hemodinámicamente inestable).

Considérese un parámetro P y defínase, en el contexto pertinente, su valor ideal N y su tolerancia T como una fracción de N . De este modo el producto numérico NT puede ser utilizado para establecer el rango de variación permitido a P :

$$\begin{array}{l} M_{max} = N + NT \\ M_{min} = N - NT \end{array}$$

donde M_{max} es el límite superior de aceptabilidad de P y M_{min} es el límite inferior de aceptabilidad para P . De este modo, dado un valor cualquiera v de P se puede establecer que:

- v es anormalmente alto si $v > M_{max}$
- v es normal si $v \in [M_{min}, M_{max}]$
- v es anormalmente bajo si $v < M_{min}$

En este caso la clasificación simbólica del valor numérico v de P ha sido realizada según una aproximación categórica en donde N y T no vienen afectados de incertidumbre.

A modo de ejemplo, véase la siguiente expresión (que podría perfectamente darse en un caso clínico real): "la presión sistólica ideal de este paciente dada su situación debería estar alrededor de 130 mmHg. Oscilaciones del parámetro entre 100 y 155 mmHg podrían considerarse aceptables". Es evidente que en una declaración ideal como la anterior, tanto el valor de la presión sistólica como su tolerancia vienen afectados de imprecisión lingüística. En este caso $N = 130$ mmHg y $T \approx 0.21$ (ya que $130 + 0.21 * 130 = 157.3$ y $130 - 0.21 * 130 = 102.7$ —ambas diferencias poco significativas con respecto a los valores establecidos como máximo y mínimo en la declaración).

Dado que N y T se presumen valores imprecisos se definen sendos factores de confianza para N y para T, respectivamente c_n y c_t , ambos en el intervalo cerrado $[0,1]$. De esta forma podemos definir los correspondientes factores de desconfianza de N y T como $f_n = 1 - c_n$ y $f_t = 1 - c_t$. Cuando estos valores, f_n y f_t , son combinados con los valores esperados, N y T, obtenemos cierta borrosidad de forma que N y T dejan de ser valores puntuales para convertirse en zonas difusas cuyos límites vienen establecidos del siguiente modo: Para N,

$$\begin{aligned} N^+ &= N + f_n N = N(1 + f_n) \\ N^- &= N - f_n N = N(1 - f_n) \end{aligned}$$

y para T,

$$\begin{aligned} T^+ &= T + f_t T = T(1 + f_t) \\ T^- &= T - f_t T = T(1 - f_t) \end{aligned}$$

Sea a continuación \mathcal{N} el conjunto de los límites de imprecisión de N: $\mathcal{N} = \{N^-, N^+\}$ y \mathcal{T} el conjunto de los límites de imprecisión de T: $\mathcal{T} = \{T^-, T^+\}$. Razonando por analogía, si en la aproximación categórica el producto numérico NT se utilizaba para establecer el rango de variación del parámetro P, en esta aproximación debe ser el producto cartesiano $\mathcal{N} \times \mathcal{T}$ el utilizado para el mismo propósito. Así si

$$\mathcal{K} = \mathcal{N} \times \mathcal{T} = \{N^-, N^+\} \times \{T^-, T^+\} = \{N^-T^-, N^-T^+, N^+T^-, N^+T^+\}$$

entonces $\forall c_t \neq 1, \forall c_t \geq 0$ y $\forall c_n \neq 1, \forall c_n \geq 0$, la combinación lineal de los elementos de \mathcal{K} con los elementos apropiados de \mathcal{N} genera exactamente ocho valores numéricos del tipo $N_\alpha = N^i \pm N^j T^k$ con $i = j$ ó $i \neq j$; $i = +, -$; $j = +, -$. Con estos ocho elementos numéricos podemos definir un conjunto ordenado \mathcal{M} de los elementos de \mathcal{N} tal que

$$\mathcal{M} = \{M_{max}, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_{min}\}$$

donde $M_{max} > M_1 > M_2 > M_3 > M_4 > M_5 > M_6 > M_{min}$.

Estos ocho valores numéricos definen nueve rangos a los cuales es necesario asociar los elementos correspondientes del conjunto semántico Σ de acuerdo con la jerarquía lingüística y semántica. De este modo, dado un valor v del parámetro P:

- V es muy alto si $V > M_{max}$

- V es bastante alto si $M_1 < V < M_{\max}$
- V es alto si $M_2 < V \leq M_1$
- V es ligeramente alto si $M_3 < V \leq M_2$
- V es normal si $M_4 \leq V \leq M_3$
- V es ligeramente bajo si $M_5 \leq V < M_4$
- V es bajo si $M_6 \leq V < M_5$
- V es bastante bajo si $M_{\min} \leq V < M_6$
- V es muy bajo si $V < M_{\min}$

Este resultado refleja la situación más imprecisa posible en nuestro modelo, situación en la que los nueve elementos del conjunto semántico definido son requeridos para representar el valor simbólico del parámetro monitorizado.

Un aspecto importante a considerar es qué elementos del conjunto semántico definido inicialmente hay que asociar a los correspondientes rangos numéricos cuando la disminución de incertidumbre en los parámetros considerados implica utilizar un menor número de etiquetas lingüísticas de las definidas en el conjunto Σ . Un análisis dinámico del modelo permite dar respuesta a esta cuestión. En un principio se puede considerar un valor ideal N del parámetro P , su tolerancia T y uno de los factores de confianza, por ejemplo c_n . Con estas premisas se consideran N , T , c_n y f_n constantes y, para evitar la aparición de la aproximación categórica como caso límite del análisis dinámico se asume que $c_n \neq 1$ y por lo tanto $f_n \neq 0$. En este caso cuando c_t se incrementa desde un valor inicial hasta $c_t = 1$ (indicando en este caso una evolución de la confianza en T hasta total confianza), los rangos numéricos asociados con los elementos correspondientes del conjunto semántico evolucionan según se muestra en la Figura 4-11 en la cual, inicialmente, los nueve elementos semánticos son necesarios. Se pasa a continuación a una situación intermedia en la que sólo cinco elementos son precisos y, finalmente sólo tres etiquetas lingüísticas son necesarias.

Un análisis de esta figura muestra que, a medida que c_t aumenta los elementos sutiles del conjunto semántico (i.e. bastante alto, ligeramente alto, ligeramente bajo y

bastante bajo) se asocian con rangos numéricos que disminuyen continuamente a expensas de un ensanchamiento de los rangos asociados a los elementos más categóricos del conjunto Σ .

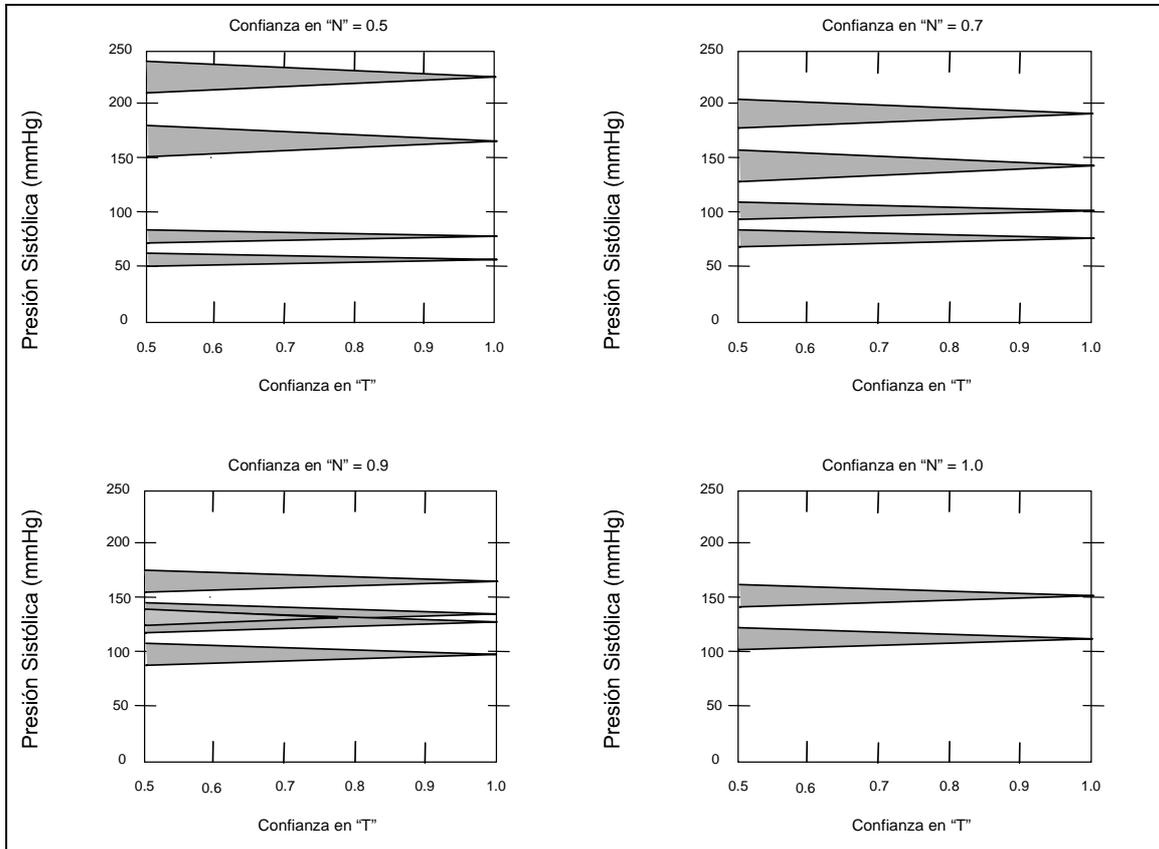


Figura 4-11: Evolución de los rangos numéricos cuando crece la confianza en N

En el caso límite $c_t = 1$ los elementos sutiles del conjunto semántico desaparecen y la incertidumbre queda únicamente representada por elementos categóricos. Cuando se parte de una situación de confianza total en uno de los parámetros y se varía progresivamente la confianza en el otro hasta la confianza total, de los cinco elementos del conjunto semántico inicialmente requeridos se pasa tan solo a tres, precisamente los más categóricos. De este modo el propio modelo suministra de forma coherente una asignación de elementos literales apropiada, además de contener a la clasificación simbólica categórica de parámetros numéricos como un caso particular. La evolución en la asignación de literales se muestra en la Figura 4-12.

Este modelo obviamente resuelve de forma elegante los problemas de adaptación de rangos a casos específicos así como el manejo de incertidumbre asociada a la

clasificación simbólica de parámetros. No obstante, la utilización rutinaria de este modelo puso de manifiesto otros inconvenientes que necesariamente había que resolver. Dichos inconvenientes surgen de la aplicación del modelo en el entorno clínico y son, por una parte, lo excesivamente tedioso que resulta la definición de valores ideales, tolerancias, confianzas en valores ideales y confianzas en tolerancias para todos y cada uno de los parámetros monitorizados y, por otra parte, el excesivo número de cuantificadores semánticos que, desde una perspectiva operativa, se requieren cuando se manejan situaciones de máxima incertidumbre. Este modelo, además, es simétrico respecto a las confianzas pero asimétrico en cuanto a los resultados de su aplicación ya que, al operar sobre porcentajes de valores, los mayores intervalos de borrosidad se consiguen con los límites máximos de aceptabilidad. Esta es también una deficiencia que debía de ser corregida. Considerando todas estas nuevas limitaciones, el modelo inicialmente propuesto fue modificado estructuralmente aunque se mantuvo la filosofía inicial de trabajo.

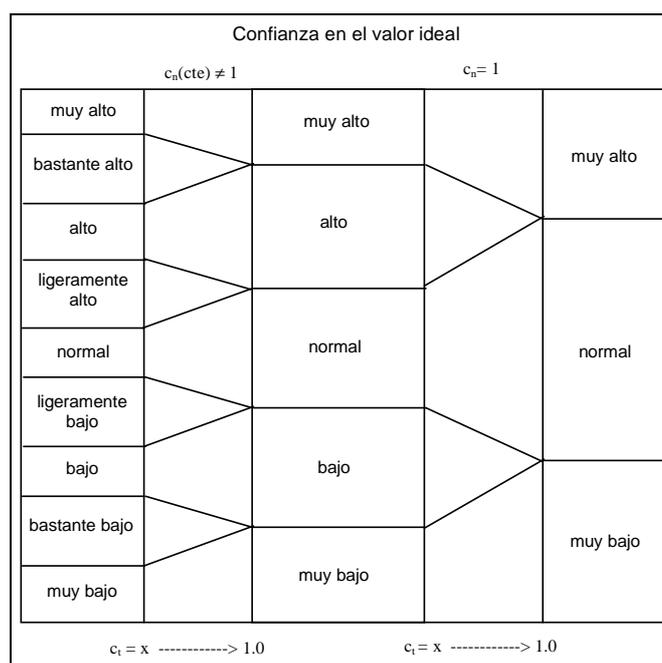


Figura 4-12: Evolución de la confianza y asignación de literales correspondiente

En una nueva aproximación, se considera que todos los valores numéricos de un determinado parámetro clínico pueden representarse en el intervalo semántico $\{anormalmente_alto, anormalmente_bajo\}$, por lo que una representación práctica y conveniente de la incertidumbre dentro de este espacio semántico puede lograrse

considerando el siguiente conjunto de etiquetas que conforman nuestro conjunto semántico Σ :

$$\Sigma = \{anormalmente_alto, alto, aceptable, bajo, anormalmente_bajo\}$$

El conjunto de alarmas definibles para un determinado parámetro P se puede construir mediante el establecimiento de unos límites inferior y superior a partir de los cuales el correspondiente parámetro P será considerado anormalmente alto o anormalmente bajo.

Sea VP_{max} el límite superior de aceptabilidad definido para P y VP_{min} el límite inferior de aceptabilidad definido para P. En este caso el incremento de VP: $\Delta VP = VP_{max} - VP_{min}$ representa la tolerancia o el espacio numérico en el cual debemos definir la cuantificación semántica difusa o, lo que es lo mismo, es en este espacio numérico en donde deberemos establecer los elementos sutiles del espacio lingüístico. Tales elementos serán obtenidos como fracciones del incremento VP que acabamos de definir.

Sea P el parámetro considerado, definimos $\Phi_p = f VP$ como un incremento relativo de P en donde f es un número en el intervalo cerrado [0.0, 1.0]. Así, dentro del límite de tolerancia definido para P, los límites relativos de aceptabilidad para el parámetro P se pueden definir del siguiente modo:

$$\begin{array}{l} (lim_p)^+ = VP_{max} - \Phi_p = VP_{max} - f\Delta VP \\ (lim_p)^- = VP_{min} + \Phi_p = VP_{min} + f\Delta VP \end{array}$$

Así para todo P y para todo valor V del parámetro P:

- P es anormalmente alto $VP > VP_{max}$
- P es alto $VP_{max} \geq VP \geq (lim_p)^+$
- P es aceptable $(lim_p)^+ > VP > (lim_p)^-$
- P es bajo $(lim_p)^- \geq VP \geq VP_{min}$
- P es anormalmente bajo $VP_{min} > VP$

Esta aproximación tiene varias ventajas con respecto a la anterior. En primer lugar, los clínicos están acostumbrados a definir límites superiores e inferiores más que

a definir valores ideales y tolerancias. En segundo lugar, el establecimiento de un único factor corrector para los intervalos de variabilidad de las variables es también una práctica fácilmente asimilable por el personal clínico. Por otra parte, la utilización de un espacio semántico con cinco categorías lingüísticas es más natural en el entorno en el que el sistema ha de trabajar y, además, tiene un significado clínico evidente: parámetros considerados *anormalmente altos* o *anormalmente bajos* generan acciones clínico-terapéuticas inmediatas mientras que ligeras desviaciones de la normalidad habitualmente se traducen en situaciones de "pre-alarma" o en seguimientos más estrechos de ciertas situaciones. En cierto modo estos elementos sutiles son indicadores de evoluciones. Nótese también que la simetría de este modelo puede ser manipulada a voluntad. Para ello basta con considerar distintos factores f para los límites superior e inferior, como puede fácilmente observarse en el siguiente ejemplo, en donde MAP es la presión arterial media.

$$\text{MAP}_{\max} = 110 \text{ mmHg}$$

$$\text{MAP}_{\min} = 75 \text{ mmHg}$$

$$\Delta\text{MAP} = 35 \text{ mmHg}$$

$$f_{\max} = 0.20$$

$$f_{\min} = 0.15$$

En este caso:

$$(\text{lim}_{\text{MAP}})^+ = 103 \text{ mmHg}$$

$$(\text{lim}_{\text{MAP}})^- = 80 \text{ mmHg}$$

Como consecuencia, aunque el espacio semántico es el inicialmente definido, los rangos numéricos varían de acuerdo con los incrementos relativos definidos para cada parámetro.

Esta ha sido precisamente la aproximación que finalmente ha sido implementada en la última versión del módulo determinístico para la clasificación simbólica de parámetros. Como ilustración del proceso, y según los requerimientos inicialmente establecidos para nuestro sistema de monitorización inteligente, en un paciente "adulto" sin complicaciones y con una fisiología "normal" algunos de los criterios podrían ser los siguientes:

Medida	Máximo	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Mínimo	$f_{max} = f_{min}$
Presión Sistólica (mmHg)	150	142	118	110	0.2
Presión Diastólica (mmHg)	95	88	67	60	0.2
Frecuencia Cardíaca (bpm)	110	102	68	60	0.2
Concentración de HCO ₃	26	24	18	16	0.2
Presión arterial de CO ₂ (mmHg)	50	46	34	30	0.2
Presión arterial de O ₂ (mmHg)	110	102	78	70	0.2
pH	7.50	7.46	7.34	7.30	0.2

Dado que el sistema ha sido diseñado para permitir una completa particularización de criterios, adaptables al paciente y caso clínico concreto, el sistema incluye procedimientos que permiten la modificación "on-line" de los mismos, además de las conversiones automáticas que el sistema genera cuando el paciente cambia de situación fisiopatológica (i.e. presencia de fallo renal que evoluciona a corrección de fallo renal).

El modelo, aunque es de naturaleza totalmente *ad hoc* y por lo tanto carente de justificación teórica formal, ha demostrado ser una excelente herramienta de clasificación simbólica totalmente adaptada a la realidad clínica de gran número de pacientes individuales [84].

4.4.4.2 Módulo Heurístico

El módulo heurístico puede considerarse como el núcleo inteligente del sistema. Su principal cometido es el de analizar toda la información simbólica disponible con el fin de obtener, a través del uso de estructuras de control y representación de conocimiento generales, conclusiones en forma de diagnósticos y terapias adaptadas al caso clínico.

El módulo heurístico, cuya estructura interna aparece en la Figura 4-13, está integrado por un sistema experto en el cual se ha usado un esquema de representación del conocimiento mixto, basado en reglas de producción para incorporar conocimiento procedimental y orientado a objetos para representar los elementos relevantes del dominio. Las reglas de producción son adecuadas para representar conocimiento de una forma modular que facilite su codificación y su posterior modificación. Además, se asemejan bastante al modo de representar el conocimiento que tienen los expertos. Por otra parte, la orientación a objetos añade a las ventajas de la modularidad, la reusabilidad y la herencia de propiedades entre objetos de la misma clase.

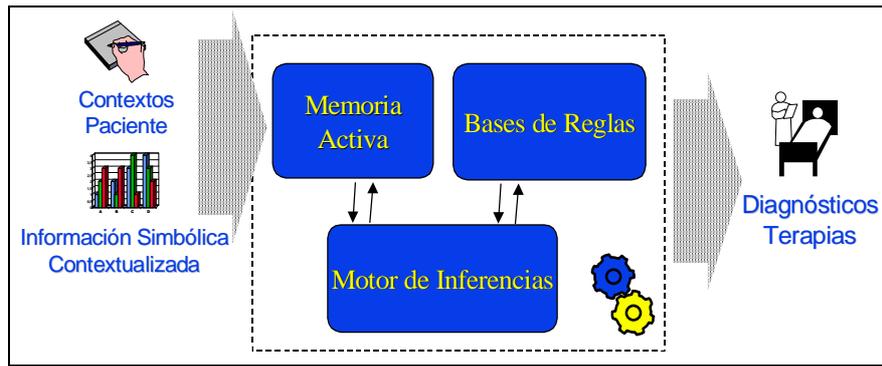


Figura 4-13: Organización del módulo heurístico

En el módulo heurístico se han definido cinco clases de objetos:

- parámetros demográficos, fisiológicos y ventilatorios
- contextos específicos
- interpretaciones clínicas
- información y gestión terapéutica
- información de control inferencial

con lo cual toda la información relevante para el proceso inferencial se encuentra representada: datos y variables del paciente, diagnósticos e interpretaciones, y terapias. En la Figura 4-14 puede verse una representación esquemática de la clase *parámetros*, las subclases *parámetros demográficos*, *parámetros fisiológicos* y *parámetros ventilatorios*, y los objetos que les pertenecen.

La base de conocimientos, que opera sobre los literales asociados con los parámetros que monitoriza el sistema, contiene criterios de evaluación general. Los matices asociados con la información numérica han sido tratados previamente durante la fase de procesamiento simbólico, con lo cual la tarea de implementación de la base de conocimientos por parte del ingeniero de conocimiento se convierte en una tarea mucho más simple y precisa y se refleja en un menor número de reglas. A pesar de ello, las inferencias que realiza el sistema y las conclusiones obtenidas están adecuadas al caso clínico merced a la contextualización previa de los datos.

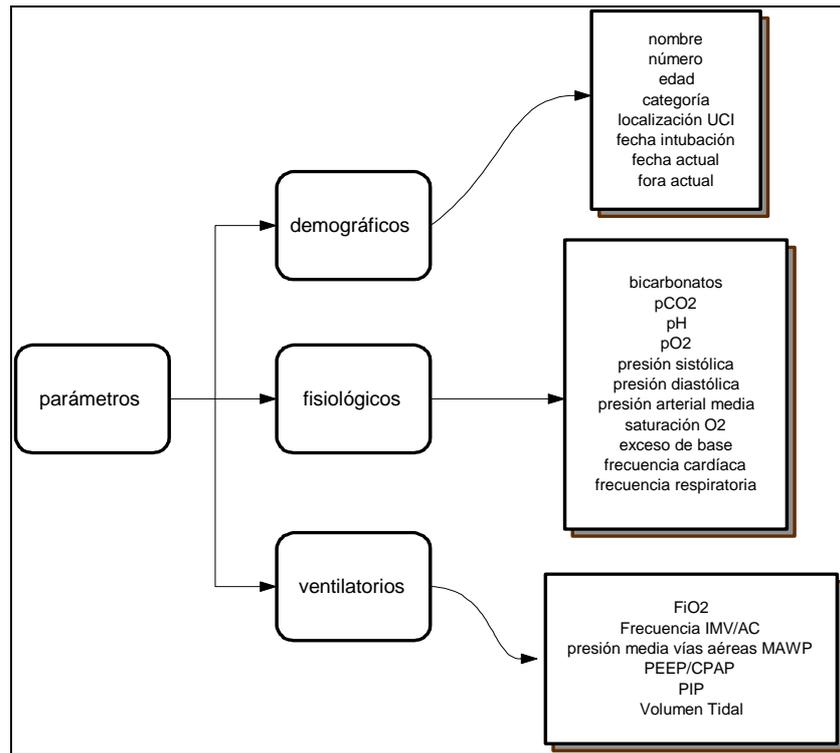


Figura 4-14: Ejemplo de la estructura de clases y objetos

La tarea de análisis del módulo se centra en la interpretación de condiciones gasométrica, hemodinámica y respiratoria del enfermo. Los resultados de la aplicación de la base de conocimientos son la identificación de estados tales como *Hipertensión* o *Acidosis metabólica* y la prescripción de una terapia ventilatoria acorde con el caso.

Los *contextos inferenciales*, mostrados en la Figura 4-15, representan toda aquella información adicional que puede ser requerida por el módulo heurístico para el establecimiento de diagnósticos y terapias o para explicar las causas de un determinado desorden clínico y, por tanto, adquieren su relevancia en este módulo. Su papel consiste en discriminar entre un conjunto de interpretaciones clínicas equiprobables, es decir, un conflicto inferencial [82], y explicar los resultados del razonamiento.

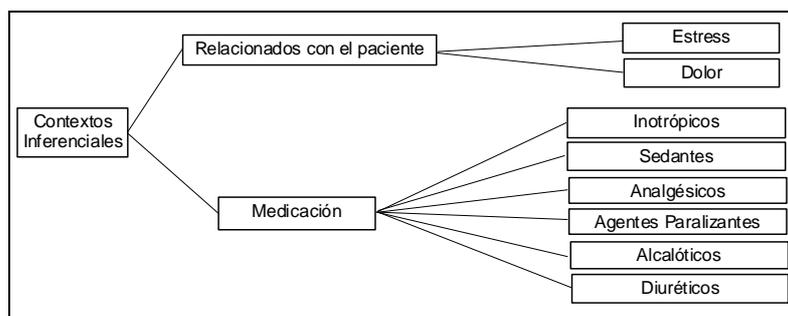


Figura 4-15: Contextos inferenciales

Respecto a la validación de los datos, el módulo heurístico incluye procedimientos para la detección de artefactos inferenciales, es decir, aquellas asociaciones de valores semánticos que, si bien han sido verificados por el módulo determinístico y aceptados para el tratamiento inferencial, implican relaciones causales imposibles, es decir, responden a una imposibilidad fisiológica.

La heurística terapéutica que ha sido incorporada al sistema posibilita que el sistema no funcione según una base categórica, sino que más bien considera la fisiopatología global del paciente en su contexto natural e inferencial y recomienda un conjunto de acciones posibles y razonables para solucionar o corregir desviaciones del comportamiento esperado. Por ello se define globalmente al sistema como supervisor, colaborador del clínico que trata de simplificar la tarea terapéutica limitándose a presentarle acciones *razonables* en base al estudio del estado del paciente.

4.4.4.3 Módulo de Control Temporal

La tarea de monitorización en la unidad de cuidados intensivos requiere la identificación de eventos significativos a partir de grandes volúmenes de datos. Normalmente, el objetivo de identificar condiciones anormales tan pronto como sea posible, trae como consecuencia un incremento del tiempo que el sistema dedica a la tarea de adquisición de datos, aunque en la mayoría de ese tiempo, los datos no sean interesantes en la medida en que confirman información recopilada previamente. Por tanto es necesario alguna técnica de abstracción de valores que pueda filtrar el flujo de entrada de datos al sistema y que permita que éste reaccione solo a cambios significativos en los datos. Otro aspecto deseable en un sistema de monitorización es la capacidad para no considerar datos cuya validez temporal no sea ya significativa, lo cual aligeraría la carga computacional del sistema. Por ello, la estrategia básica de control del proceso de monitorización completo presta una atención especial a este tipo de implicaciones temporales encontradas en el entorno ICU.

El control temporal de un proceso de monitorización exige definir una serie de *categorías de tiempo* como son las siguientes. En un principio es necesario considerar para cada paciente un *Tiempo de Decisión*, TD, que especifica un tiempo de supervisión rutinario (e.g., "este paciente debería ser reevaluado cada dos horas" \Rightarrow TD = 2h). Por otra parte, adecuado a cada variable i se define una *Persistencia*, $P(i)$, un *Tiempo de*

Parámetro $T(i)$, y un Valor, $V(i)$. La persistencia, $P(i)$, se define como el intervalo de tiempo durante el cual se considera que el valor de una variable i , $V(i)$, no ha cambiado de forma significativa, mientras que el tiempo de parámetro, $T(i)$ representa el tiempo transcurrido desde la última adquisición de $V(i)$. Finalmente, el *Tiempo de Proceso*, TP, representa el tiempo transcurrido desde el último TD, siendo TD mucho mayor que cualquiera de los $P(i)$.

La identificación de eventos en los segmentos de tiempo delimitados por estas categorías permite la definición de tres situaciones que se usan para gobernar el proceso de monitorización, tal y como se muestra en la Figura 4-16. Estas situaciones son las siguientes:

- *Normalidad*. Este caso ocurre cuando ha finalizado el *Tiempo de Decisión* TD y por ello se requiere una reevaluación completa de la condición fisiopatológica del paciente, todos los parámetros han sido considerados como *aceptables* por el módulo determinístico durante TD, y además no existe ninguna indicación que sugiera que el paciente está evolucionando hacia la "anormalidad". En este caso no se requieren acciones especiales, y las sugerencias del sistema se dirigen al simple ajuste de los parámetros del ventilador al objeto de mantener y/o mejorar el estado fisiopatológico del paciente que posibilite el destete.
- *Pre-Alarma*. Este caso ocurre cuando el *Tiempo de Decisión* TD se ha consumido y, por lo tanto se requiere una evaluación completa del estado fisiopatológico del paciente. Además, todos los parámetros han sido considerados como *aceptables* por el módulo determinístico durante TD, y la evolución temporal de uno (o más) de los parámetros involucrados en el proceso de monitorización sugiere que el paciente está evolucionando hacia la "anormalidad".
- *Alarma*. El módulo determinístico detecta esta situación cuando el valor de un parámetro dado, previamente aceptado para tratamiento simbólico (i.e. descartado como artefacto instrumental), se evalúa como *anormalmente alto* o como *anormalmente bajo* después de la tarea de procesamiento simbólico.

En este caso, se requiere una reevaluación inmediata del paciente y se invoca al módulo heurístico para que sugiera la posible terapia.

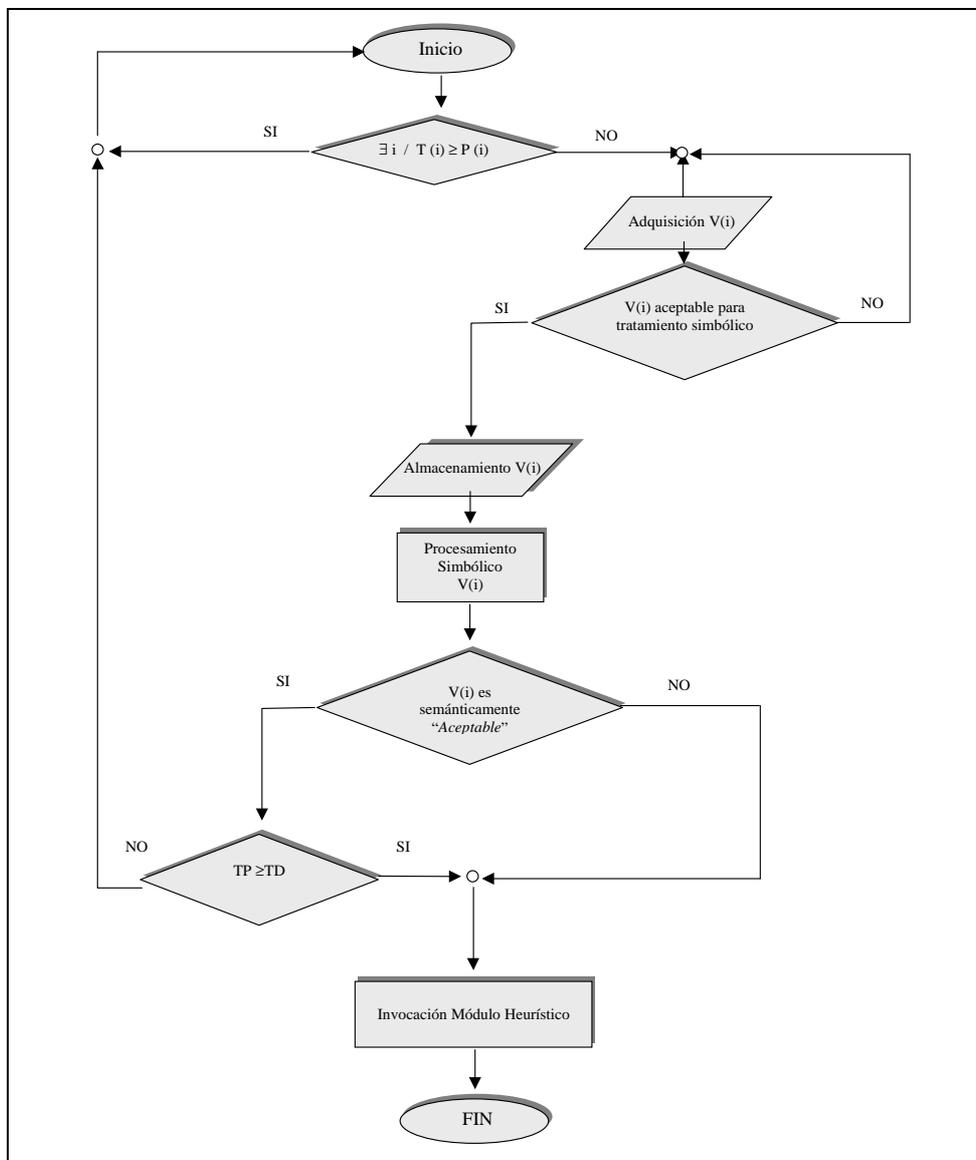


Figura 4-16: Control temporal del proceso de monitorización para cada variable $V(i)$

La situación de *Pre-alarma* requiere un tratamiento especial, ya que necesita la determinación de ciertas tendencias en los valores de los parámetros. La detección de dicha situación pasa por la activación de una base de reglas temporal del módulo heurístico, que considera la *evolución* de los parámetros durante TD y la *posición relativa* del último $V(i)$ con respecto a los límites superior e inferior de aceptabilidad definidos para i . Un ejemplo de la estructura de este tipo de reglas del sistema, aparece

en la Figura 4-17. La evolución temporal de los valores de los parámetros se lleva cabo mediante un sencillo análisis de tendencias que tiene en cuenta las pendientes de las rectas que pasan por los puntos que definen los valores recientes del parámetro. Para el reconocimiento de las situaciones “Cerca del Máximo” o “Cerca del Mínimo” se utilizan criterios que introduce el clínico en el sistema, ya que forman parte de su experiencia clínica, mas que criterios ya establecidos en la practica.

La detección de una situación de *Pre-alarma* se asocia con una rutina específica y con una serie de acciones que pueden sugerirse (i.e. modificaciones en TD, modificaciones en $P(i)$, decisiones terapéuticas específicas, ajustes en los parámetros del ventilador, disparo de un proceso inferencial dado, ...), todas ellas basadas en la experiencia clínica, y por supuesto totalmente adaptables al tipo de médico que usa el sistema. Esta identificación de la pre-alarma permite la anticipación a evoluciones del paciente no deseadas, es decir, en cierto modo permite predecir el futuro estado del paciente.

```
IF: 1) V(i) ha sido considerado "Aceptable" durante DT,  
And: 2) El parámetro "i" ha sido "Incremental" durante DT,  
And: 3) El último V(i) durante DT  
      está "Cerca del Máximo" valor considerado Aceptable,  
  
THEN: 1) Debe considerarse una situación de Pre-Alarma  
And: 2) Disparar la rutina de "PreAlarma+" activada por el parámetro "i"
```

Figura 4-17: Regla de detección de situaciones de Pre-alarma

Como conclusión, el módulo de control temporal, que se ocupa de la identificación de las situaciones de *Normalidad*, *Pre-alarma*, y *Alarma*, permite realizar ajustes dinámicos y una priorización de las tareas de monitorización de acuerdo a las necesidades del paciente así como también una anticipación a evoluciones indeseables, a veces mucho más importante que comprobar la situación concreta de los parámetros dentro de los límites establecidos.

4.5 Resumen

Este capítulo presenta una visión general de los requisitos fundamentales que es necesario considerar cuando se aborda la tarea de construcción de un sistema de monitorización inteligente en el área de ventilación mecánica en Unidades de Cuidados

Intensivos. El análisis del entorno clínico ha mostrado una serie de aspectos mejorables, tanto de tipo clínico como de tipo administrativo, en el desarrollo de las tareas típicas del personal sanitario. La sobrecarga de información, que hace difícil la tarea médica del diagnóstico, la supervisión rutinaria de pacientes y la integración de información clínica de múltiples fuentes, son aspectos que apoyan la construcción de un sistema de gestión de información. Además, es deseable que el sistema cuente con capacidades inteligentes de asesor diagnóstico y terapéutico, de forma que el clínico pueda contrastar sus opiniones.

El capítulo además está centrado en el diseño del sistema inteligente, que teniendo en cuenta el carácter cíclico de la monitorización, separa sus tareas en dos módulos, el módulo determinístico, dedicado a resolver el problema de la adquisición de datos que incorpora un mecanismo de interpretación contextualizada de los mismos, y el módulo heurístico, que se ocupa de la parte típicamente inteligente del procesamiento inferencial de la información con el fin de ofrecer su visión diagnóstica y terapéutica del problema clínico. Sin embargo, y debido a las implicaciones temporales de los datos, es necesario un tercer módulo que gobierne, controle, gestione y dirija el proceso global de la monitorización, dotando del significado temporal a las conclusiones del sistema.

5. REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

*Cuanto más sabe un hombre, menos habla.
(Anónimo)*

*Lo que el hombre quiere no es conocimiento,
sino certeza.
(Bertrand Russell)*

*Si un hombre comienza con verdades, finalizará
entre dudas; pero si se conforma con empezar
entre dudas, terminará con certezas.
(Sir Francis Bacon)*

5.1 Introducción

La Representación del Conocimiento es el área de la Inteligencia Artificial que trata con el problema de representar, mantener y manipular el conocimiento sobre el dominio de aplicación. Ya que virtualmente todos los sistemas basados en Inteligencia Artificial tienen que abordar este problema, la investigación en el área de Representación de Conocimiento es uno de los campos centrales de la Inteligencia Artificial [85]. Los principales esfuerzos en el área están encaminados en cuatro direcciones: (1) representación de conocimiento sobre áreas de aplicación, como la medicina, la meteorología y los sistemas físicos, (2) desarrollo de lenguajes de representación adecuados, (3) especificación y análisis de razonamiento sobre el conocimiento representado y, (4) implementación de sistemas que soporten ambos aspectos de representación y razonamiento sobre el conocimiento representado.

El problema de la representación del conocimiento es clave en la Inteligencia Artificial desde el momento en que se postula que un sistema inteligente debe incorporar el saber concerniente a las decisiones que debe tomar. Por ello es imprescindible un paso previo de adquisición de conocimiento. De la tarea se ocupa la Ingeniería de Conocimiento (IC) que, como parte ingenieril de la inteligencia artificial, trata de definir y de utilizar un conjunto de métodos que permitan adquirir conocimiento de alto nivel, formalizarlo, representarlo según un esquema computacionalmente eficaz, y utilizarlo para resolver problemas en dominios de aplicación concretos. Se puede establecer una simple analogía con la programación convencional para atisbar las diferencias que subyacen de las tareas que involucran cada una de ellas, y que se muestran en la Tabla 5-1 [1].

<i>Ingeniería del Conocimiento</i>	<i>Programación convencional</i>
Elección de una lógica	Elección de un lenguaje de programación
Construcción de una base de conocimientos	Elaboración de un programa
Implantación de la respectiva teoría de demostración	Elección o elaboración de un compilador
Inferencia de nuevos hechos	Ejecución de un programa

Tabla 5-1: Ingeniería de Conocimiento vs Programación Convencional

En ambos casos, a partir de la descripción de un problema o de una situación determinada, y mediante la definición del lenguaje, se deducen nuevas consecuencias. En el caso del programa, la salida se deduce de la entrada utilizando el programa; en el caso de la base de conocimientos, las respuestas se deducen de las descripciones de los problemas y de la base de conocimientos. Entonces, ¿cual es la utilidad de la IC?. La ventaja principal es que implica menos obligaciones, y por ello menos trabajo. El ingeniero sólo tendrá que determinar qué objetos y relaciones son los que vale la pena representar y qué relaciones guardan entre si dichos objetos. Frente a ello, un programador, además de todo lo anterior, tiene que decidir cómo se van a calcular las relaciones que existen entre los objetos, a partir de cierta entrada inicial dada. Además, el ingeniero de conocimiento especifica qué se considera como verdad, y el procedimiento de inferencia decide cómo convertir los hechos en solución del problema. Los hechos son válidos independientemente de la tarea, con lo cual es posible utilizar las bases de conocimiento en otras tareas sin necesidad de adaptarlas. Y, por último, las tareas de depuración de una base de conocimientos se ven facilitadas por el hecho de que una sentencia determinada será verdadera o falsa por si misma, en tanto que la exactitud de la sentencia del programa dependerá en gran medida del contexto en el que se encuentre.

De manera análoga a la Ingeniería del Software, que define una metodología de análisis y especificación de requisitos del problema, la IC plantea una metodología de adquisición del conocimiento con las siguientes fases: *conceptualización, formalización, elicitación, operacionalización, verificación y revisión*. La conceptualización obtiene todas las entidades relevantes del dominio, la formalización decide el tipo de estructura de representación más útil de cada una de ellas y la elicitación extrae de una forma estructurada el conocimiento de los expertos humanos. La fase de operacionalización culmina el trabajo de las tres anteriores construyendo procedimientos de representación

más apropiados que permitan al conocimiento elicitado ejecutar las tareas deseadas. Por último, la verificación y revisión comprueban el funcionamiento de las estructuras implementadas y, si procede, efectúan las correcciones oportunas.

A la hora de construir una base de conocimientos, el ingeniero debe seleccionar del dominio los objetos y relaciones significativas y mapearlos a objetos y relaciones computacionales en un programa [86]. Por tanto, cualquiera que sea el dominio de aplicación, el ingeniero se encuentra con dos tipos de entidades, como son los hechos, o verdades del dominio, y las representaciones de estos hechos, o estructuras internas que el programa de IA manipula, y que se corresponden con las verdades del dominio.

En este punto es útil aclarar la diferencia entre esquema y lenguaje de representación, que es similar a la diferencia que existe entre estructuras de datos y lenguajes de programación. Los lenguajes de programación son el medio de implementación; las estructuras de datos el esquema. Por tanto, cuando se habla de representación interna de conocimiento, se refiere al lenguaje, mientras que si se cita la estructura, se menciona el esquema de presentación. Así pues, en un programa de IA es necesario un procedimiento que convierta hechos en representación interna y viceversa, a través de un ciclo de codificación-decodificación [44].

Los esquemas estructurados de representación del conocimiento existentes se clasifican en una cualesquiera de las siguientes categorías: (a) Métodos Declarativos, y (b) Métodos Procedimentales.

Los esquemas declarativos hacen énfasis en la representación del conocimiento como una acumulación de hechos estáticos, a los que se añade cierta información limitada que describe cómo se va a emplear el mencionado conocimiento. Los esquemas de este tipo presentan ciertas ventajas. Así, las verdades del dominio se almacenan una sola vez. Además, es fácil incrementar e incorporar nuevo conocimiento sin modificar ni alterar el ya existente. Ejemplos de este tipo son las *frames*, los *scripts*, las redes semánticas y los modelos de dependencia conceptual.

Por el contrario, los esquemas procedimentales enfatizan la representación del conocimiento en forma de estructuras dinámicas, que describen procedimientos de utilización de los conocimientos. En realidad, los problemas interesantes de inteligencia artificial suelen requerir distintas proporciones de ambas filosofías en la representación

del conocimiento del dominio. También los esquemas procedimentales potencian las capacidades inferenciales del sistema, permitiendo explorar distintos modelos y técnicas de razonamiento, trabajar con información incompleta e incorporar de forma natural conocimiento heurístico. El ejemplo más representativo de este tipo de esquema son las reglas de producción.

Independientemente del esquema elegido, éste debe verificar las cuatro propiedades siguientes:

- *Adecuación Representacional*: Capacidad de representar las distintas clases de conocimiento del dominio.
- *Adecuación Inferencial*: Capacidad de manipular el conocimiento para obtener nuevo conocimiento.
- *Eficiencia Inferencial*: Versatilidad en la utilización de aquella información que permita optimizar el proceso inferencial.
- *Eficacia Adquisicional*: Capacidad de incorporar información y conocimiento nuevos.

Otras propiedades que en mayor o menor grado deben satisfacer se refieren a la granularidad, la exhaustividad, la plasticidad y la eficiencia computacional, además de la naturalidad, la sencillez y la modularidad [2].

La selección y granularidad de los símbolos atómicos de la base de conocimientos determina en cierto modo qué puede describirse sobre el mundo. Debe existir un adecuado balance entre el coste en eficiencia y expresividad, ya que las estructuras grandes pueden oscurecer las entidades conceptuales, mientras que estructuras sencillas pueden manejarse más fácilmente.

La exhaustividad de la base de conocimientos es otra propiedad que deben verificar. Un *mapping* entre entidad conceptual-entidad representacional es exhaustivo con respecto a una propiedad o clase de objetos si todas las ocurrencias corresponden a elementos explícitos de la representación. Sin embargo, se puede decir que la exhaustividad no es total en las bases de conocimiento.

Por último, la plasticidad de la representación está relacionada con el problema de la falta de exhaustividad de las bases de conocimiento. Por ello, la modificación o

actualización debería ser fácil y debería garantizarse la consistencia de la base de conocimiento, por ejemplo, a través del uso de mecanismos de herencia.

Una vez definidos los entidades básicas del dominio, sus relaciones y el esquema y lenguaje de representación elegidos, el Ingeniero de Conocimiento ya está dispuesto para enfrentarse con la tarea del diseño de la base de conocimientos del nuevo sistema experto. Sin embargo, existen una serie de herramientas de desarrollo de sistemas expertos que hacen más sencillas las tareas clásicas de adquisición de conocimiento y desarrollo e implementación del sistema. Como herramienta de desarrollo del módulo heurístico de PATRICIA ha sido elegida NEXPERT OBJECT, cuyas características más sobresalientes se detallan a continuación.

5.2 NEXPERT Object: La Herramienta de desarrollo

5.2.1 Introducción

NEXPERT Object® es una herramienta de desarrollo de aplicaciones basadas en conocimiento que combina distintos mecanismos de representación [87]. Permite al Ingeniero de Conocimiento capturar los hechos y la información procedural del dominio de interés en reglas, pero a la vez también permite capturar información descriptiva sobre el mundo real en clases y objetos. El uso conjunto de estos dos paradigmas permite la modelización del razonamiento del dominio y los objetos afectados por este razonamiento. Por ello, se puede definir como un sistema híbrido.

5.2.2 Estructuras de representación básicas

Las entidades del dominio del problema se representan por medio de objetos y clases. El *objeto* representa el elemento más pequeño de información en el sistema. Las *clases* agrupan o generalizan un conjunto de objetos. Funcionalmente actúan como plantillas que definen las características que los miembros deben poseer. Tanto los objetos como las clases se describen por medio de *propiedades* que representan sus características, y los valores de estas propiedades, cuyo tipo es posible definirlo, se almacenan en *slots*.

Los mecanismos de herencia incorporados en el sistema permiten que tanto las propiedades como los valores de las propiedades de una clase u objeto sean heredados de otra clase u objeto. La herencia incrementa la eficiencia, ya que el atributo particular

tan sólo necesita ser declarado una vez, da consistencia al esquema ya que todo lo que hereda un atributo se comporta de la misma forma, y por último proporciona generalidad.

Para modelar completamente el dominio, en concreto el razonamiento, NEXPERT ofrece otro tipo de estructuras, como son las reglas de producción. Las reglas representan las relaciones, las heurísticas, el conocimiento procedural y la estructura temporal del conocimiento en un formato clásico de IF <condición> THEN <conclusión>, donde <condición> puede ser única o el resultado de evaluar un conjunto de ellas, relacionadas con operadores lógicos AND y OR, y la conclusión, única, se constata cuando la premisa es cierta. Cada condición tiene una estructura de terna <parámetro/relación/valor>, en donde los parámetros son las características que se desean investigar y el operador de relación definido permite compararlas con los valores correspondientes al objeto de averiguar si la cláusula es cierta o no.

Sin embargo, y a diferencia de la configuración típica, la herramienta contempla la posibilidad de que la regla pueda contener acciones a ambos lados. La muestra la estructura básica.

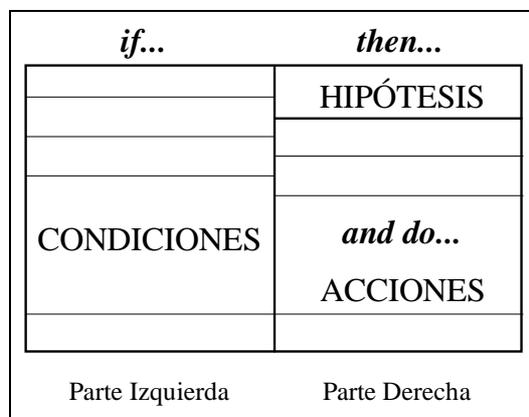


Figura 5-1: Estructura básica de las reglas de NEXPERT

La interrelación entre los dos tipos de planos del conocimiento en NEXPERT, reglas y objetos, se puede ver en la Figura 5-2. En el plano vertical aparece la jerarquía de clases y objetos, que interseca con el plano de reglas, que contiene el árbol de reglas que se construye a través de las condiciones e hipótesis compartidas. El elemento común de ambos planos son los slots, que como ya se dijo, almacenan los valores de las propiedades de objetos y clases.

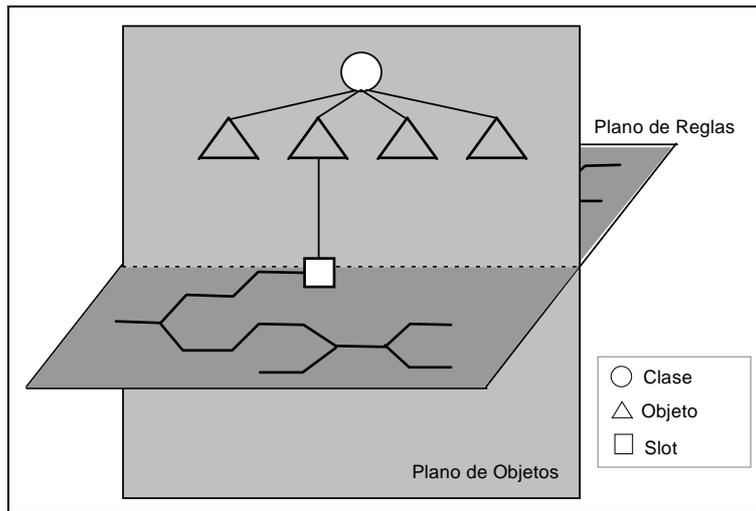


Figura 5-2: Representación de los dos planos del conocimiento en NEXPERT

Un ejemplo de regla podría ser el siguiente, donde se evalúan los valores numéricos de la presión arterial sistólica, diastólica y media para tratar de determinar la posibilidad de existencia de un diagnóstico de hipertensión arterial.

```
IF:      (1) La presión arterial sistólica es mayor de 160 mmHg,  
AND:    (2) La presión arterial diastólica es mayor de 95 mmHg,  
AND:    (3) La presión arterial media es mayor de 130 mmHg  
THEN:   El paciente presenta hipertensión arterial,  
ACTION: Actualizar la base de datos con la conclusión
```

La regla anterior, descrita en lenguaje natural, podría traducirse del siguiente modo en el formato interno de NEXPERT:

```
(@RULE= Hemodinamica_1  
  (@LHS=  
    (> (Presion_Arterial_Sistolica) (160))  
    (> (Presion_Arterial_Diastolica) (95))  
    (> (Presion_Arterial_Media) (130))  
  )  
  (@HYPO= Hipertension_Arterial)  
  (@RHS=  
    (Write ("conclusiones.dbf") (@TYPE=DBF3; @FILL=ADD;  
  @PROPS=Hipertension_Arterial;  
  @FIELDS="Hemodinamica";))  
  )  
)
```

La representación de conocimiento mediante reglas de producción presenta ciertas ventajas. Así, las condiciones y las acciones involucradas son explícitas. Además, el conocimiento es representado de forma muy modular ya que cada regla de un sistema dado constituye una unidad completa de conocimiento. Por último, las reglas de producción permiten almacenar y utilizar conocimiento de una gran especificidad y el conocimiento implicado suele ser de naturaleza heurística.

5.2.3 Razonamiento y Conocimiento de Control

5.2.3.1 La Agenda de NEXPERT

La agenda es el mecanismo organizativo de la ocurrencia de eventos durante la tarea de procesamiento del conocimiento. Haciendo una similitud con la programación clásica y la estructura con la que guarda más parecido, el *stack*¹⁴, se observa que éste último está manejado por un algoritmo Last-Input-First-Output (LIFO), es decir, el último elemento introducido es el primero en la cola de salida, mientras que la agenda permite la modificación dinámica de la lista de eventos insertando nuevos elementos con prioridades diversas. Además integra mecanismos para resolver conflictos cuando debe adoptarse una decisión entre dos caminos de razonamiento diferentes, e incorpora razonamiento no monótono, que permite cambiar conclusiones previas que han sido alcanzadas ante la llegada de nuevos datos.

La noción de foco de atención es un concepto importante en NEXPERT, porque sobre él se modela la agenda, y se puede representar como la intersección del plano de reglas y el de objetos de la Figura 5-2. En cualquier momento, la complejidad del mundo real se reduce a un conjunto limitado de parámetros y posibles decisiones. Cada uno de ellos podrá interferir en el mundo y quizá en los siguientes eventos o acciones que hubieran sido planificadas. La agenda, en suma, ejemplifica la adaptabilidad del sistema al mundo real, a las situaciones de tiempo real. A medida que cambie el foco de atención, la agenda desplaza los planos de conocimiento uno sobre el otro para adaptarse a la nueva situación

¹⁴ Pila, estructura organizativa de datos en la cual los datos se insertan y se recuperan por su cima.

5.2.3.2 Procesamiento del Conocimiento

La agenda NEXPERT contiene una lista priorizada de hipótesis, no reglas, porque lo que se evalúa es el estado de una hipótesis, aunque para ello tenga que ejecutar una o más reglas. Cuando una hipótesis de una regla se sitúa en la agenda para someterla a investigación, el sistema convierte las condiciones de la regla en relevantes para el problema y las evalúa. A medida que nuevas evidencias se encuentren disponibles, el sistema altera el foco actual de atención bien cambiando la prioridad de las hipótesis de la cola o bien añadiendo nuevas hipótesis a la pila.

El evento más básico en procesamiento del conocimiento es la evaluación de una regla, cuyo objetivo es averiguar el estado de la hipótesis. La estrategia por defecto consiste en evaluar las condiciones de la parte izquierda de la regla en orden, así como está escrita la regla, si bien éste puede ser alterado a través de la modificación de las prioridades de inferencia de los slots. Es decir, el sistema procesa primero la condición que tenga el slot con la mayor prioridad de inferencia, luego la que tenga el segundo mayor, y así sucesivamente. Al final, el slot booleano que es la hipótesis tomará uno de los cuatro valores siguientes: True, False, Notknown o Unknown, es decir, *Verdadero*, *Falso*, *No conocido* (si al menos una de las condiciones no ha podido ser determinada) y *Desconocido* (si las condiciones no han sido investigadas). Del mismo modo, cuando se trata de evaluar múltiples reglas que comparten la misma hipótesis, implícitamente se está construyendo una regla OR, y el estado de la hipótesis será *Verdadero* si al menos una regla evalúa a la hipótesis como cierta, *Falso*, si ninguna regla evalúa como cierta a la hipótesis, *No conocido*, si ninguna regla evalúa como cierta la hipótesis y al menos una no ha sido investigada, y *Desconocido*, si todavía no han sido evaluadas.

El hecho de que múltiples reglas compartan la misma hipótesis plantea una pregunta: Si la primera regla la evalúa como cierta, ¿deberían evaluarse el resto de reglas?, es decir, ¿se aplica una estrategia exhaustiva?. La respuesta correcta dependerá de la aplicación, aunque por defecto se estima necesario evaluar el resto de reglas. Sin embargo, esto plantea otro problema, el orden de evaluación. Si el orden en que deben evaluarse las reglas que apuntan a la misma hipótesis es significativo, igualmente que para los slots, es posible fijar un valor de prioridad con el fin de que la regla con mayor valor sea evaluada en primer lugar. Este mecanismo es particularmente interesante ya

que las reglas pueden disparar muchos eventos, y quizás el orden en el cual ocurran pueda ser importante.

El dinamismo de la agenda se manifiesta también en aspectos diversos como la herencia de propiedades y valores y las prioridades de inferencia de slots y reglas, por medio de las acciones de las reglas. La alteración de los patrones de herencia permite cambiar las asociaciones entre objetos y clases, y especificar en algún caso particular de quién deben heredar la propiedad, el valor del slot o incluso el metaslot. La prioridad de inferencia altera el orden de evaluación de las condiciones de una regla, o incluso el de las reglas que apuntan a una misma hipótesis. Ambos mecanismos, aplicados en estados concretos del procesamiento cambian la organización de la agenda y potencian enormemente las posibilidades del sistema

5.2.3.3 *Mecanismos de inferencia*

Los mecanismos de inferencia incorporados en NEXPERT tratan de ayudar en la búsqueda de conclusiones relevantes sin evaluar exhaustivamente todas las reglas de la base de conocimientos. De mayor a menor prioridad se pueden citar el encadenamiento hacia atrás, la sugerencia, la propagación hacia adelante de hipótesis, las puertas semánticas, las acciones de las reglas, el *volunteering* y los enlaces de contexto.

El encadenamiento hacia atrás solamente se basa en la evaluación de las hipótesis. Si en una condición (o acción de una regla) existe un slot booleano *Desconocido* que en realidad es una hipótesis, entonces las reglas que apuntan a esa hipótesis serán evaluadas seguidamente. Así pues, y como se había comentado, la evaluación se inserta en la agenda y será llevada a cabo antes de que finalice la evaluación de las condiciones o acciones que causaron el encadenamiento regresivo.

El mecanismo de sugerencia coloca la hipótesis directamente en la agenda para ser evaluada inmediatamente porque se considera como una submeta importante y, como tal, debe ser investigada lo antes posible. A diferencia del resto de mecanismos de búsqueda, la sugerencia siempre es una acción explícita que se lleva a cabo por indicación del usuario.

La propagación hacia adelante de hipótesis es una consecuencia de la investigación de las submetas. Consiste en situar en la agenda, inmediatamente después de explorar el encadenamiento hacia atrás asociado con la submeta, las hipótesis de las

reglas en las cuales aparezca la submeta como dato. Esta propagación es recursiva y se lleva a cabo hasta que una o más hipótesis terminales han sido alcanzadas.

Las puertas o *gates* es un mecanismo inferencial basado en la estructura que se encarga de insertar nuevas hipótesis de forma oportuna en la agenda. Expande el árbol de búsqueda selectivamente mientras reduce la exhaustividad de la búsqueda. Está basado en el análisis de la estructura de las reglas para identificar si cualesquiera dos reglas comparten un slot en la parte izquierda de la regla (condiciones). Cuando se evalúa un nuevo slot en la condición de una regla, se comprueba si otras reglas también tienen este slot entre sus condiciones. Si el resultado de la evaluación $\langle \text{slot} \rangle \langle \text{relación} \rangle \langle \text{valor} \rangle$ es *Verdadero*, entonces todas las hipótesis asociadas del resto de reglas que comparten este slot se introducen en la agenda. Si el resultado fuera *Falso*, las hipótesis no se meten en la agenda, y permanecen en estado *Desconocido*. Por ello, aunque las *gates* sitúen hipótesis en la agenda, ellas mismas podrán generar a su vez nuevos eventos cuando sean evaluadas.

De la misma forma que las *gates*, las acciones son un mecanismo de propagación hacia adelante cuyo último resultado consiste en situar nuevas hipótesis en la agenda a través de un conjunto de operadores. Sin embargo no son selectivas, ya que introducen en la cola cualquier hipótesis que albergado en la parte izquierda de la regla un slot que haya sido afectado por la acción, aunque se conozca que la condición sea *Falsa*.

El *volunteering* permite asignar valores particulares a ciertos slots de la base de conocimientos, con lo cual el efecto es similar a los que ocurre con las acciones: cualquier hipótesis que use este valor en una o más condiciones de la parte izquierda de sus reglas será introducida en la cola de la agenda. Al igual que el mecanismo de *suggest*, el *volunteer* es explícito.

Por último, el mecanismo de contextos es el evento de menor prioridad y está basado en los enlaces débiles que se establecen entre islas de conocimiento, es decir, entre grupos de reglas y objetos cuyos conjuntos de condiciones e hipótesis intersecan con otras condiciones, hipótesis y acciones. Mientras que los enlaces entre reglas dentro de la misma isla son enlaces fuertes, y se establecen por medio de encadenamientos hacia atrás, sugerencia de hipótesis, *gates* o acciones, los enlaces débiles lo hacen entre islas de conocimiento distintas a través de los enlaces de contexto. Este tipo de uniones se realizan en tiempo de diseño de la base de conocimientos y enlazan dos o más

hipótesis. Es importante destacar que las islas deben sin duda ser disjuntas, ya que si sus reglas comparten algún dato, el encadenamiento hacia delante puede tener lugar antes de que el enlace se lleve a cabo. La noción de foco de atención vuelve a manifestarse en este punto, ya que el proceso inferencial se centra en la isla de conocimientos actual e investiga todo lo concerniente a ella antes de trasladarse a otras islas.

Es importante notar la diferencia entre este mecanismo de contextos implementado en la herramienta de desarrollo y los contextos naturales e inferenciales, referidos en capítulos precedentes. Los primeros se establecen a nivel de estructura de reglas, mientras que los segundos están basados en la experiencia y se definen a nivel del conocimiento implementado.

Hasta aquí se han descrito brevemente los estructuras de representación básicas, y los procedimientos de control inferencial que incorpora la herramienta con que se ha diseñado la base de conocimientos de PATRICIA. Los siguientes apartados explican los conceptos, fundamentos y estructura del conocimiento implementado, haciendo referencia si ello fuera necesario a los aspectos discutidos de la herramienta.

5.3 Conocimiento del dominio

5.3.1 Introducción

El conocimiento implementado en la base de conocimientos del sistema objeto de la presente tesis toma como marco de referencia las Unidades de Cuidados Intensivos para tratar de aportar soluciones inteligentes al área de asistencia ventilatoria mecánica de pacientes.

Para la medicina intensiva ha supuesto un avance muy grande la introducción de los sistemas de ventilación mecánica artificial. Los pacientes incapacitados para mantener autónomamente un intercambio gaseoso adecuado deben ventilarse artificialmente conectándolos a un ventilador mecánico que reemplaza total o parcialmente la acción espontánea de respirar [88]. El objetivo primordial de estos sistemas es evitar niveles muy bajos en sangre arterial de oxígeno, es decir, lo que médicamente se conoce como hipoxia, y de pH, o acidemia. La presencia de acidemia y de altos niveles de anhídrido carbónico pueden conducir al enfermo a un estado de coma, de forma que la corrección inmediata de esta situación es fundamental para evitar

un daño cerebral irreversible, al no oxigenarse adecuadamente el cerebro [89]. El resultado deseado de la aplicación de esta terapia es promover y conseguir la respiración independiente por parte del paciente reduciendo progresivamente su dependencia de la ventilación mecánica ajustando ciertos parámetros del ventilador. Este lento proceso desde una respiración dependiente de una ventilación mecánica a la respiración autónoma se denomina *destete* y se lleva a cabo cuando: (a) las causas que motivaron la asistencia mecánica han comenzado a desaparecer; y (b) el paciente puede comenzar a respirar espontáneamente sin necesidad de ningún soporte externo. A lo largo de este proceso de retirada de la ventilación mecánica, conocido como “weaning” o “destete”, es necesario vigilar ciertos factores para determinar claramente el estado clínico del paciente y evaluar y controlar el progreso del destete [90][91]. Este ejercicio es delicado, más práctico que teórico, en el cual la experiencia del clínico, derivada de juicios de prueba y error en escenarios con pacientes similares, es esencial en el éxito o el fracaso. Además, la decisión sobre cuándo comenzar el destete no está exenta de dificultades, ya que normalmente se requiere considerar ciertas variables fisiológicas del paciente (e.g. gases sanguíneos arteriales ABG, parámetros de esfuerzo respiratorio y hemodinámica), así como considerar un pequeño "quantum" de experiencia.

A la hora de llevar a cabo la implementación del conocimiento que solucionara el problema planteado, surgió una primera división del conocimiento involucrado en tres tipos: el conocimiento fisiológico, el conocimiento diagnóstico-terapéutico y el conocimiento de control. El conocimiento fisiológico está compuesto por todos aquellos parámetros fisiológicos del paciente que hacen referencia a su metabolismo, su función respiratoria, su oxigenación y su estado hemodinámico, que determinan su condición general y, en su caso, la respuesta a la terapia sugerida, posiblemente la indicación de ventilación asistida. El conocimiento diagnóstico-terapéutico se compone de protocolos clínicos, ya sean publicados o de naturaleza totalmente heurística, que guían en la evaluación del estatus fisiológico del paciente y en la determinación del diagnóstico y la terapia que mejore su estado físico. El conocimiento de control que contiene el sistema está compuesto por todas aquellas estructuras y procedimientos que guían el proceso de inferencia, como podrían ser el metaconocimiento incorporado o el mecanismo de sugerencia de hipótesis.

Otro tipo de división del conocimiento, no tan conceptual, sino más bien física, viene motivado por la necesaria modularización. Partiendo de las tesis de Clancey que sugiere diferenciar el conocimiento de acuerdo al uso [92] (e.g. el conocimiento diagnóstico del conocimiento terapéutico), y separar el conocimiento de control del conocimiento del dominio de interés, como ha quedado plasmado en la discusión anterior, se decidió modularizar todo el universo de discurso del sistema en múltiples bases de conocimiento. De esta forma, las partes resultantes deben mostrar competencia en dominios de tareas definidas, deben ser capaces de soportar representaciones de conocimiento y estrategias de control específicas, deben facilitar su desarrollo independiente e incremental y deben asegurar la consistencia ante cambios, depuraciones y chequeos de forma que no afecten a otros gránulos de conocimiento [93]. Ciertamente la división previa del conocimiento fisiológico y diagnóstico-terapéutico encaja perfectamente con esta filosofía. En lo que respecta a las tareas de representación, implementación y revisión, la herramienta NEXPERT ofrece un amplio abanico de ayudas en el diseño al Ingeniero de Conocimiento merced al tipo de representación que soporta, híbrida de objetos y reglas, y a los propios mecanismos de verificación que no permiten la inclusión de conocimiento circular, reglas contenidas en otras, etc. Así pues, podemos extraer de la modularización una serie de beneficios claves como son:

- Asociar las bases de conocimiento con funciones particulares.
- Inhibir las interacciones no deseadas entre reglas.
- Mejorar la *performance* de la ejecución ya que sólo se carga en memoria un subconjunto de las reglas y objetos.
- Aumentar el control sobre el proceso inferencial almacenando en la memoria sólo las reglas y objetos pertinentes.
- Controlar el proceso de ingeniería software, facilitando en especial las labores de implementación.

De esta forma, la orientación modular ha sugerido separar en una base de conocimientos central todas las clases, objetos y propiedades que son comunes al resto de bases de conocimiento, con lo cual se asegura la consistencia a través de todo el conocimiento diseñado. Por otra parte, la discusión anterior referente a diferenciar el

conocimiento respecto al uso, apuntó la necesidad de construir distintas bases de conocimiento para tratar problemas diagnósticos y, a partir de sus conclusiones, elaborar terapias adecuadas con conocimiento terapéutico específico. Así pues, se implementaron bases de conocimiento que diagnostican el estado del balance ácido-base, el estado hemodinámico del paciente, la función oxigenatoria y la función respiratoria. A partir de las interpretaciones clínicas obtenidas, las bases de conocimiento terapéuticas aconsejan las directrices a seguir en lo referente a la oxigenación y a la ventilación del paciente.

A continuación se describe la estructura, contenido, interpretación clínica y fisiológica del conocimiento implementado en la base de conocimientos, ilustrando todo ello con ejemplos tomados del sistema real.

5.3.2 Clases y Objetos del dominio

El Capítulo 4 hacía mención a la tarea determinística del sistema que se encargaba de adquirir los datos necesarios para alimentar el módulo heurístico del sistema que, a partir de la información simbólica suministrada, obtenía sus resultados en forma de diagnósticos y terapias adaptadas al caso clínico. Dicha información simbólica está representada en la base de conocimientos del sistema en forma de clases y objetos que abarcan por un lado, conocimiento puramente fisiológico del paciente, y por otro, conocimiento de control para realizar el proceso inferencial.

A tenor de lo expuesto en la Figura 5-3 la clase de parámetros fisiológicos se divide en cuatro subclases como son: (a) parámetros gasométricos, (b) parámetros hemodinámicos, (c) parámetros respiratorios y (d) parámetros oxigenatorios. La clase *parámetros gasométricos* está compuesta de los objetos *presión arterial de anhídrido carbónico* ($p\text{CO}_2$), *pH* y *concentración de bicarbonatos* (HCO_3^-) en la sangre arterial, los cuales ayudan a evaluar el balance de ácido y de base del paciente, además de la *saturación de oxígeno* (SaO_2) que expresa la cantidad de hemoglobina que transporta la sangre. La subclase *parámetros hemodinámicos* tiene como objetos integrantes las presiones *sistólica*, *diastólica* y *media* y la *frecuencia cardíaca* que contribuyen a diagnosticar el estado hemodinámico del paciente, en especial, la presencia de hipertensión o estados de agitación provocados por una oxigenación inadecuada del cuerpo. La subclase *parámetros respiratorios* incluye el objeto *frecuencia respiratoria* o número de respiraciones completas por minuto que contribuye a determinar la

posibilidad de fallo del sistema respiratorio. Por último, la subclase *parámetros oxigenatorios* que involucra tres objetos como son la *presión de oxígeno en sangre arterial* (pO_2), el PEEP/CPAP y la *fracción de oxígeno inspirado* (FiO_2), expresada en tanto por ciento, evalúan respectivamente cómo es la difusión del oxígeno en los alvéolos y como pasa a la sangre, la presión positiva al final de la espiración, y por último, cual es la fracción de oxígeno presente en el aire que inspira el paciente, valor que en condiciones normales es de 0.21.

Por otra parte, la clase *parámetros ventilatorios* hace referencia a los valores de las variables de funcionamiento del ventilador, los llamados *settings*, los cuales es necesario adecuar al estado del paciente, de forma que la asistencia sea reducida a medida que el estado así lo aconseje. Los objetos IMV/AC, PIP, Volumen Tidal y MAW describen valores de frecuencia de respiración asistida, presión inspiratoria de pico, volumen inspirado o espirado en respiración normal y presión media en las vías aéreas. Estos valores, aunque numéricos, se utilizan a la hora de prescribir la terapia ventilatoria y, por consiguiente, es necesario conocer para determinar qué grado de asistencia se le está dando al enfermo.

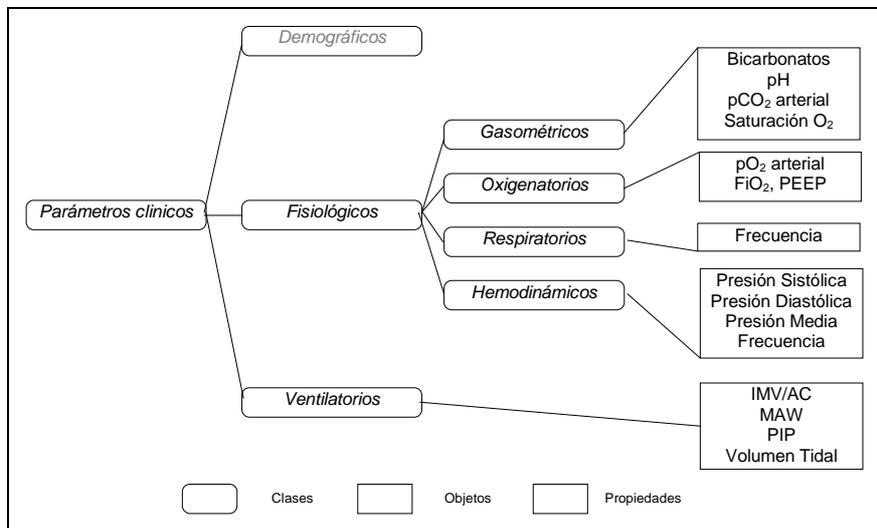


Figura 5-3: SubClases y Objetos de la clase *Parámetros Clínicos*

En el capítulo anterior se sentaban las bases sobre la aproximación de procesamiento simbólico de los datos numéricos. En esta tarea, realizada por el módulo heurístico, se realizaba una contextualización de dichas variables de acuerdo con las características propias del paciente. Similarmente, el módulo heurístico contextualiza la labor inferencial a través de los *contextos inferenciales*, que es toda aquella información

adicional que puede requerir el sistema para interpretar adecuadamente un diagnóstico dado o explicar un determinado desorden clínico. Realmente se trata de información que ayuda a discernir, en un determinado punto de la inferencia, entre dos o más situaciones que son equiprobables, es decir, un conflicto. La Figura 5-4 muestra la clase *Contextos* en la cual se agrupan las subclases *Medicación* y *Condiciones Especiales*. La subclase *Medicación* agrupa, como su nombre indica, todas aquellas medicinas que, formen parte o no del tratamiento prescrito, contribuyen a modificar la significación de las situaciones clínicas, y en su caso, a alterar el diagnóstico con su sola presencia. Por otra parte, la subclase *Condiciones Especiales* integra dos aspectos importantes en la ventilación asistida, como son el estrés y el dolor, que reflejan la confortabilidad del enfermo y se manifiestan no sólo en el aspecto hemodinámico, con agitación o movimiento excesivo, sino también en el gasométrico explicando, por ejemplo, la lucha del enfermo con el ventilador.

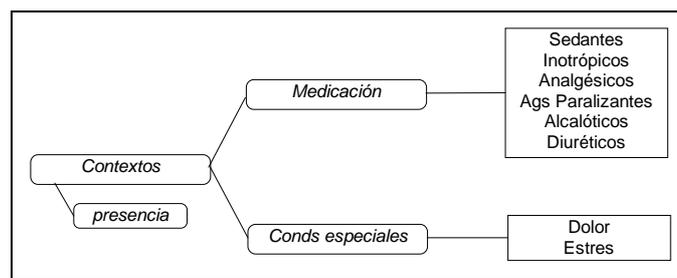


Figura 5-4: Subclases y Objetos de la Clase *Contextos*

La clase *Interpretaciones Clínicas* que aparece representada en la Figura 5-5 agrupa toda la información simbólica que cualifica el estado del balance ácido-base, la presión sanguínea, la frecuencia cardíaca, la respiración endógena y la oxigenación del paciente.

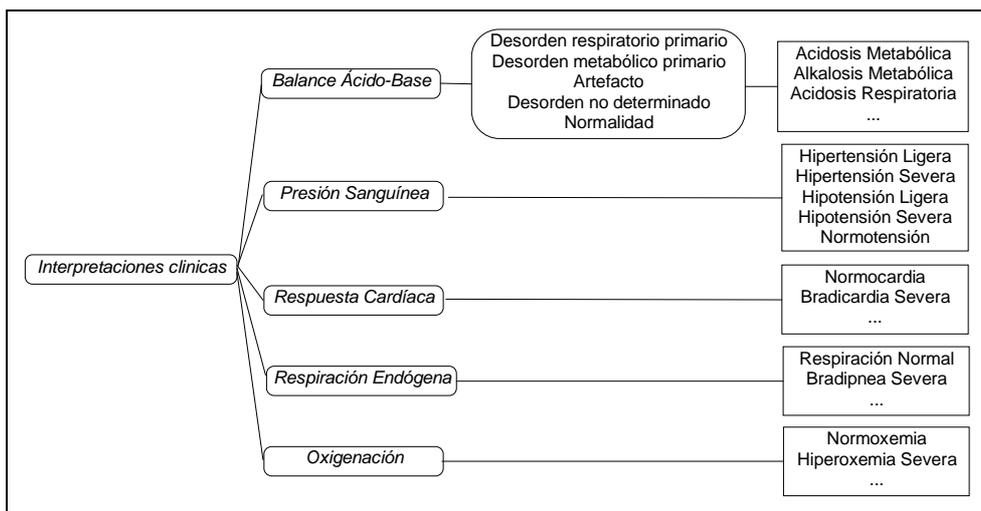


Figura 5-5: Subclases y Objetos de la Clase *Interpretaciones Clínicas*

Una vez realizada la interpretación clínica de los parámetros involucrados y determinado el diagnóstico del estado del paciente en lo referente a las categorías descritas con anterioridad, es posible obtener una terapia integrando toda la información precedente. La clase *Terapia*, reflejada en la Figura 5-6, se compone de dos subclases: la subclase *información* y la subclase *gestión*. La primera agrupa interpretaciones del sistema referentes a la condición del paciente respecto a los cuatro sistemas básicos: ventilación, hemodinámica, respiración y oxigenación. La segunda, teniendo en cuenta la información anterior, prescribe una terapia que trate de conseguir una situación óptima del paciente respecto a sus subsistemas persiguiendo el fin último de la desconexión y destete.

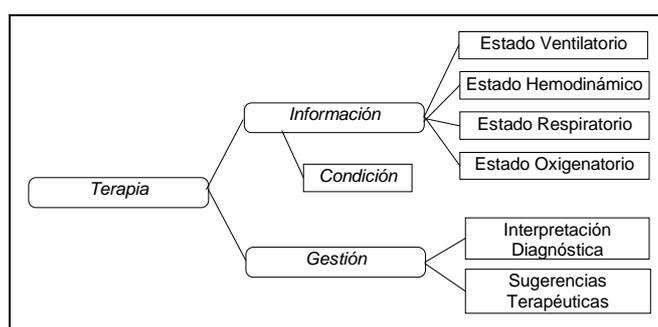


Figura 5-6: Subclases y Objetos de la Clase *Terapia*

Finalmente, y como medio de propagación del razonamiento, existen una serie de objetos agrupados en torno a la clase *Control* que representan hipótesis y conclusiones intermedias sobre situaciones gasométricas, hemodinámicas, respiratorias, etc. A causa

de que su cometido es meramente funcional, y no tienen significación clínica ninguna, se obvia su descripción.

5.3.3 Bases de reglas

La modularización a que se hacía antes referencia ha obligado a particionar el conocimiento diagnóstico-terapéutico en distintas bases de reglas con el fin de lograr la separación del conocimiento respecto al uso. De ello resultan 4 bases de reglas diagnósticas que se ocupan del estado del balance ácido-base, la hemodinámica, la oxigenación y la respiración, y 2 bases de reglas terapéuticas, la relativa a la oxigenación y la correspondiente a la ventilación.

5.3.3.1 Balance ácido-base

El balance ácido-base es el término que se utiliza para expresar el modo en el cual el cuerpo humano mantiene su concentración de iones hidrógeno (pH, entre los valores 7.38 y 7.42), a pesar de la producción constante de productos finales catiónicos por procesos metabólicos [94]. Cuando este pH se incrementa o se decrementa, se aplican los términos de *alkalemia* o *acidemia*, respectivamente [95]. Las desviaciones se compensan a través de un mecanismo llamado *sistema de buffer* bicarbonato-dióxido de carbono (C-B). Se pueden distinguir dos tipos de desórdenes en este equilibrio, causados por procesos patológicos o no fisiológicos: (a) respiratorios primarios, si alteran inicialmente el pCO₂, y (b) metabólicos primarios, si repercuten en los bicarbonatos. El desorden inicial causa primero un cambio en el pH, que luego es modulado por el citado sistema C-B. Así pues, se producen respuestas compensatorias metabólicas y respiratorias que mitigan este cambio de pH. En la Tabla 5-2 se puede ver un resumen de estas situaciones básicas.

<i>Desorden</i>	<i>pH</i>	<i>Desorden Inicial</i>	<i>Compensación</i>
Acidosis Metabólica	↓	↓↓ [HCO ₃] ⁻	↓ PCO ₂
Alkalosis Metabólica	↑	↑↑ [HCO ₃] ⁻	↑ PCO ₂
Acidosis Respiratoria	↓	↑↑ PCO ₂	↑ [HCO ₃] ⁻
Alkalosis Respiratoria	↑	↓↓ PCO ₂	↓ [HCO ₃] ⁻

↑ = incremento, ↓ = decremento, ↑↑ = gran incremento, ↓↓ = gran decremento

Tabla 5-2: Compensación en Desórdenes ácido-base simples

La respuesta más rápida del mecanismo compensatorio corresponde a la respiración, ya que se producen cambios en la ventilación que alteran el $p\text{CO}_2$ (el desorden secundario) para devolver a la normalidad a la concentración de ion hidrógeno. Por ejemplo, un paciente con acidosis metabólica provoca una reacción compensatoria de incremento de la ventilación con lo cual el sujeto exhala CO_2 y el pH arterial vuelve a la normalidad. La respuesta más lenta, que se completa a lo largo de unos días, ocurre cuando el riñón excreta más ácido y menos bicarbonato, con el fin de oponerse al desorden primario.

A tenor de lo expuesto, se puede comprobar que el balance ácido-base afecta a la ventilación. Por ejemplo, la acidosis metabólica estimula de tal modo la respiración que causa hiperventilación y puede llegar a entorpecer de tal forma el sistema nervioso central que puede llevar al coma. De sus causas, quizás la más importante sea la posibilidad de fallo renal. En cuanto a la alcalosis metabólica, quizá el mayor peligro estriba en la posibilidad de sobreexcitar al sistema nervioso y causar trastornos cardiovasculares graves.

Todo este conocimiento ha sido añadido al sistema, cualificando la situación de acidosis o alcalosis en función de la severidad (aguda o no aguda), que se obtiene a través del procesado simbólico del módulo determinístico. Así pues, se incorporaron reglas para detectar las cuatro situaciones puras, en las que no existía mecanismo compensatorio, resultando un total de 8 reglas. Las situaciones compensatorias definidas en la Tabla 5-2 suponen 4 reglas más para el sistema. Sin embargo, es posible que en determinadas situaciones dicha respuesta compensatoria sea menor que la esperada, por ejemplo si se habla de un aumento de ventilación para disminuir el nivel de $p\text{CO}_2$ en una situación de acidosis metabólica, con lo cual se produciría un segundo desorden primario, en este caso una acidosis respiratoria [94]. Por ello fue necesario incluir conocimiento que manejara este tipo de combinaciones, resultando un total de 8 reglas más, considerando la cualificación. En total, la base de reglas gasométricas maneja 21 situaciones de diagnóstico ácido-base, incluyendo por supuesto la situación de normalidad.

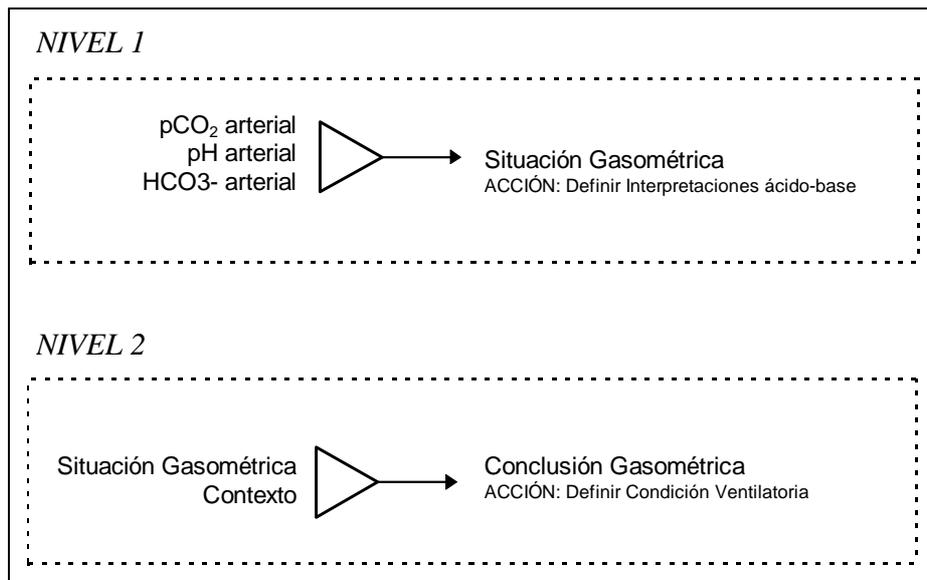


Figura 5-7: Estructura de las reglas de la base de reglas gasométricas

En la Figura 5-7 se observa la estructura de las reglas, que en un primer nivel identifican la situación gasométrica en función de los valores simbólicos de pCO_2 , pH y HCO_3^- , definiendo la correspondiente interpretación ácido-base (i.e. acidosis metabólica pura, alcalosis respiratoria con acidosis metabólica compensatoria, etc.). En caso de que dicha situación no pudiera reconocerse de entre una de las 21 básicas, el sistema obtiene más información a partir de los contextos inferenciales, que ayudan a explicar dicha situación. En este momento es posible determinar la condición ventilatoria del paciente. Un ejemplo de todo esto se puede ver en la Figura 5-8 en la cual aparece la representación de una regla que no puede concluir nada acerca de la situación.

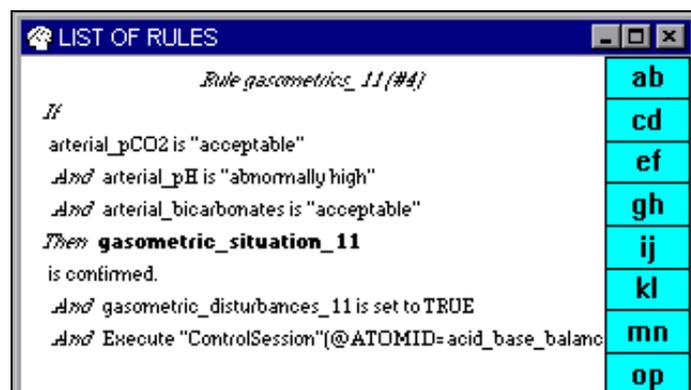


Figura 5-8: Regla de producción de la base de reglas gasométricas

En el siguiente paso de razonamiento, el sistema integra el contexto adecuado para intentar explicar el desequilibrio, y concluye que la información gasométrica disponible es errónea, tal y como se ve en la Figura 5-9.

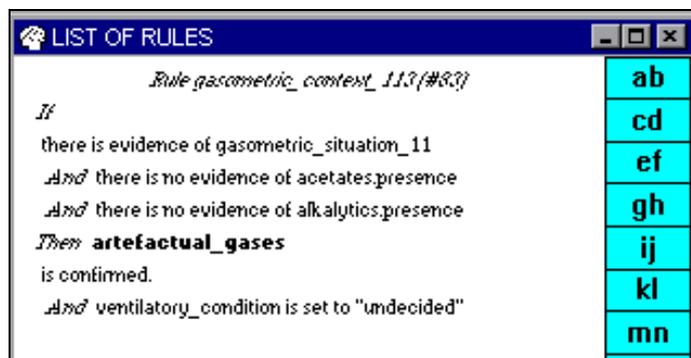


Figura 5-9: Los valores simbólicos gasométricos y el contexto no pueden explicar la situación

Por el contrario, en la Figura 5-10 se representa una regla en la que la información de contexto contribuye a caracterizar y explicar heurísticamente la situación.

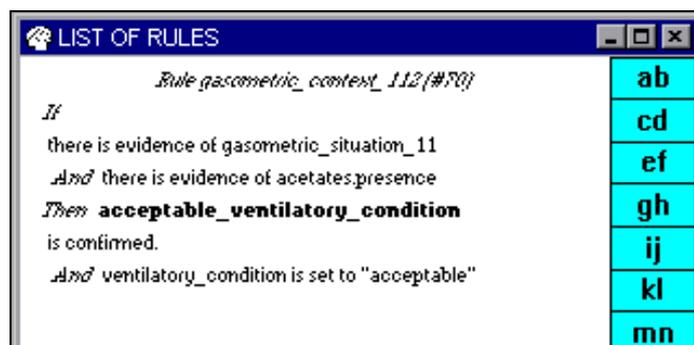


Figura 5-10: El contexto ayuda a explicar heurísticamente la situación

Por último, habiendo concluido como veraz alguna hipótesis sobre la situación gasométrica, o bien afirmando la artefactualidad de la información simbólica proporcionada por el módulo determinístico, un tercer nivel de la base de reglas se encarga de las tareas explicativas del proceso inferencial, componiendo un informe en un formato adecuado al usuario. La Figura 5-11 muestra una regla-ejemplo de esta tarea.

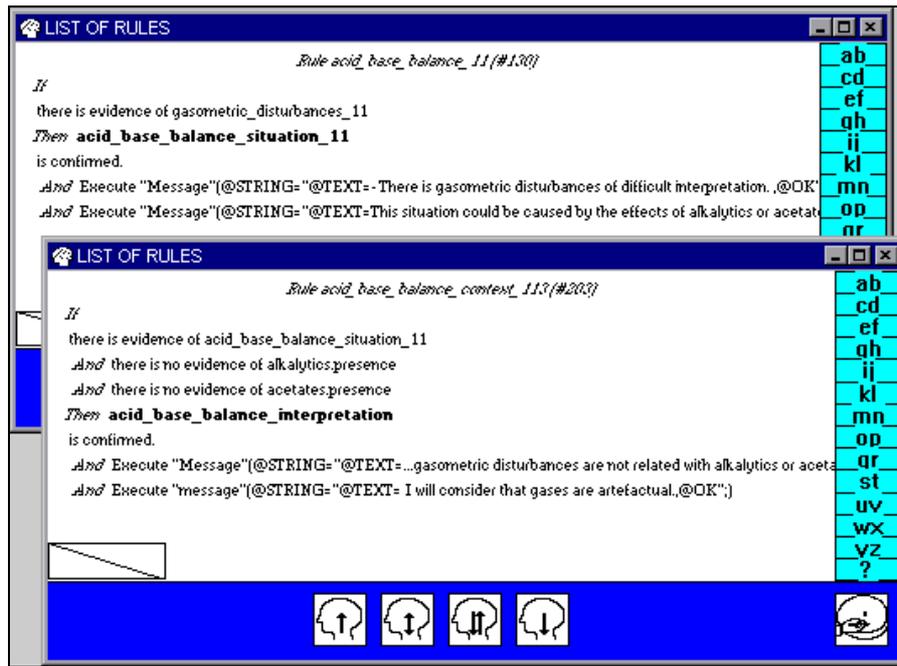


Figura 5-11: Capacidades de explicación del sistema

5.3.3.2 Hemodinámica

La determinación del estado hemodinámico es otro de los pilares fundamentales en el análisis del estado ventilatorio de enfermos con fallo respiratorio. La meta es mantener el suministro de oxígeno a órganos y tejidos del cuerpo, en especial al sistema pulmonar. Además, es esencial determinar el estado de la función cardíaca del paciente para comprobar si tiene reserva cardíaca para resistir el estrés de la intubación. Por ejemplo, un aumento de frecuencia cardíaca por encima de la normalidad, conocido como taquicardia, normalmente sugiere un déficit de flujo o de volumen sanguíneo; pero en cambio puede ser el resultado de ansiedad, estrés, fiebre, etc.

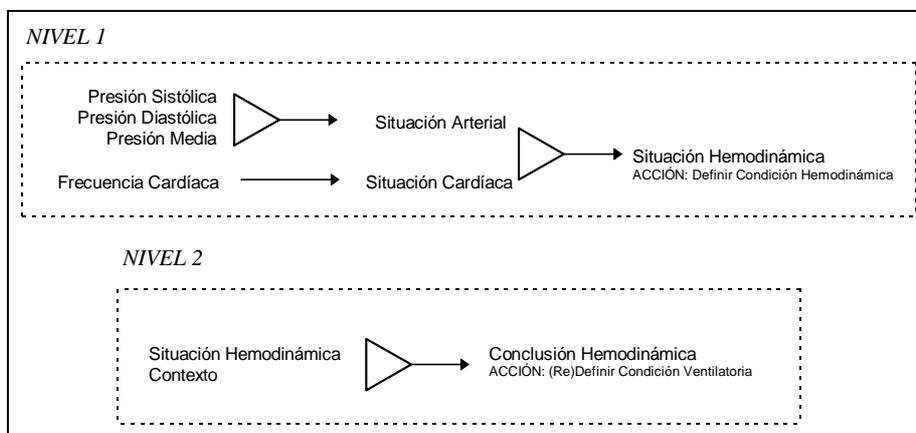


Figura 5-12: Estructura de las reglas de la base de reglas hemodinámicas

La base de reglas hemodinámica, que aparece en la Figura 5-12, se organiza en una estructura de dos niveles, en la que un primer nivel se ocupa de determinar la situación cardíaca y arterial del enfermo, para posteriormente integrarlas en un diagnóstico hemodinámico conjunto, concluyendo la estabilidad o inestabilidad del sistema. El segundo nivel interpreta contextualmente la situación hemodinámica por si es necesario, a la vista de los nuevos datos, redefinir la condición ventilatoria previamente definida. Además, este segundo nivel se encarga, igualmente que la base de reglas gasométricas, de componer un informe de explicación de sus resultados. En la Figura 5-13 se puede ver reglas-ejemplo de este proceso en dos niveles.

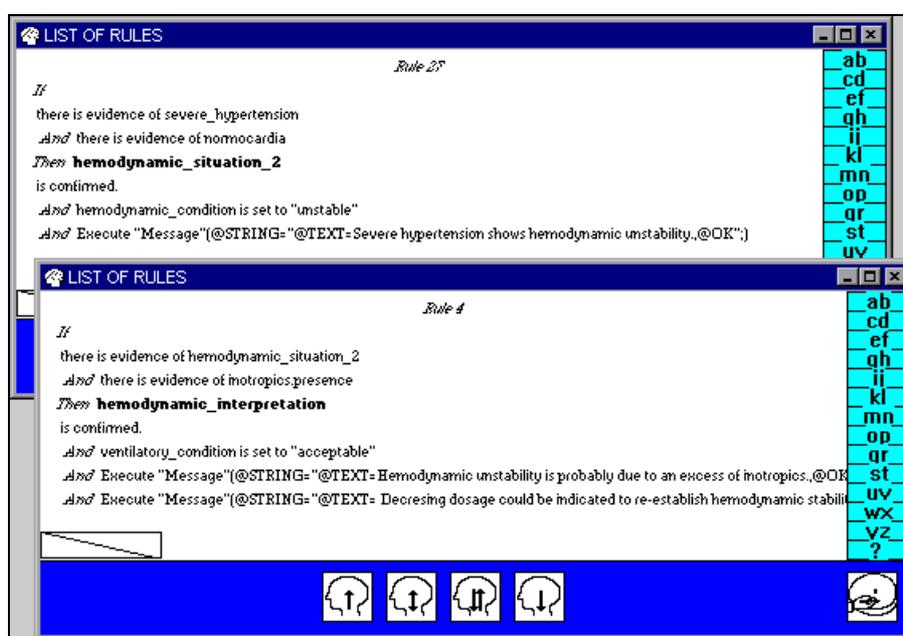


Figura 5-13: La situación hemodinámica se explica a través del contexto

5.3.3.3 Oxigenación

Para medir el grado de oxigenación de un paciente se recurre a la medida de la presión parcial de O₂ en sangre. La razón puede explicarse teniendo en cuenta que el oxígeno disuelto cumple la Ley de Henry que establece que la solubilidad de un gas en una solución líquida es proporcional a la presión parcial del gas [94]. La demanda de oxígeno por parte del cuerpo varía dependiendo de la situación del enfermo, pero cualquier déficit puede decirse que está relacionado con algún desorden respiratorio, como la capacidad de difusión de los alvéolos para transferir el oxígeno a la sangre, la hipoventilación pulmonar o los problemas de transporte de O₂ en sangre [96].

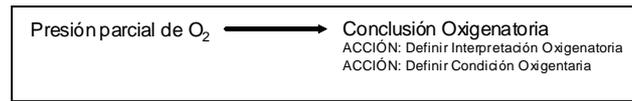


Figura 5-14: Estructura de la base de reglas de oxigenación

La base de reglas oxigenatorias tiene la estructura que se observa en la Figura 5-14. Una vez determinado el valor simbólico de pO_2 , que se corresponde con una interpretación oxigenatoria (i.e., hipoxemia ligera, hipoxemia severa, etc.) se define la condición oxigenatoria y se calcula un nuevo valor de FiO_2 . El FiO_2 , como ha sido descrito, es la fracción de oxígeno disuelto en aire inspirado por el paciente. En condiciones normales (i.e. aire normal) este valor se corresponde con un 21%, pero en pacientes intubados puede incrementarse y llegar a valores del 100%, dependiendo de las necesidades oxigenatorias del enfermo y complicaciones que le afecten. Sin embargo, la terapia de oxígeno puede llegar a deshabilitar el mecanismo de dirección de la respiración y llegar a ser mortal. En la Figura 5-15 puede observarse una regla-ejemplo, que además aporta capacidad explicatoria al informe final del sistema.

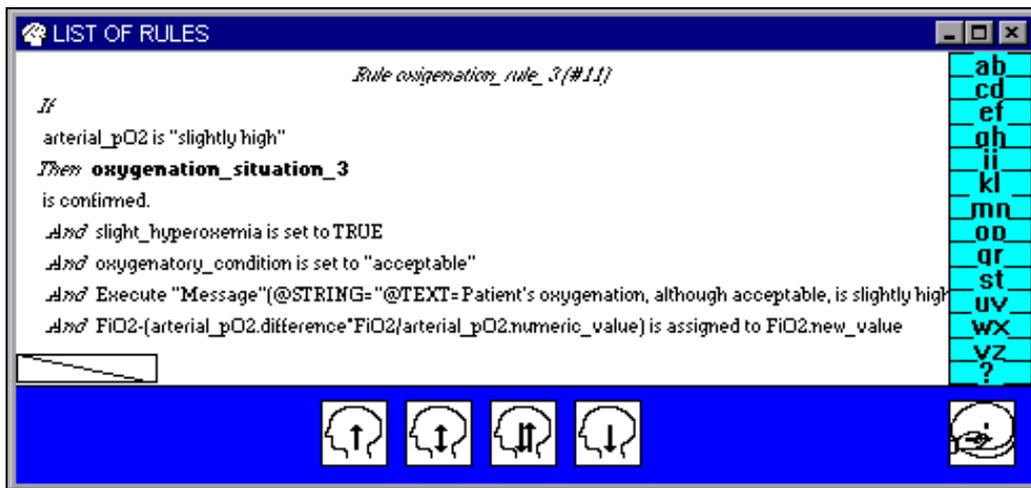


Figura 5-15: Regla de la base de conocimientos oxigenatoria que calcula el nuevo FiO_2

5.3.3.4 Respiración

Para instaurar un proceso de ventilación mecánica en pacientes, uno de los aspectos primordiales que hay que comprobar es la posibilidad de fallo de la bomba ventilatoria del paciente, ya sea por fatiga muscular, defectos mecánicos de la pared del tórax o una reducción en la capacidad de dirección del centro de la respiración [97]. A diferencia de los gases en sangre arterial (ABG) una de las respuestas más rápidas a un

decremento en el nivel de tensión arterial de O₂ o un incremento en el de CO₂ es un aumento en la frecuencia respiratoria, un indicador de un previsible fallo respiratorio o de una incapacidad del paciente por restaurar los niveles normales de ambos gases. Por otra parte, la insuficiencia respiratoria, causada por una inadecuada ventilación a nivel alveolar o por anomalías de perfusión, es un claro indicador de un previsible paro respiratorio, que también determina una inmediata ventilación artificial [98]. Como se ve, no sólo la ausencia de respiración sugiere intuitivamente un proceso de ventilación artificial, sino también un aumento de la frecuencia respiratoria.

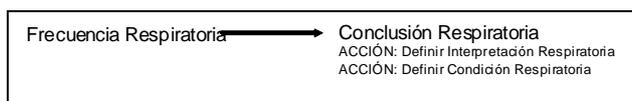


Figura 5-16: Estructura de la base de reglas respiratorias

En la Figura 5-16 se muestra la estructura que siguen las reglas respiratorias del sistema y en la figura siguiente se observa una regla-ejemplo, en la que también se incorporan las facilidades de explicación anteriormente mencionadas.

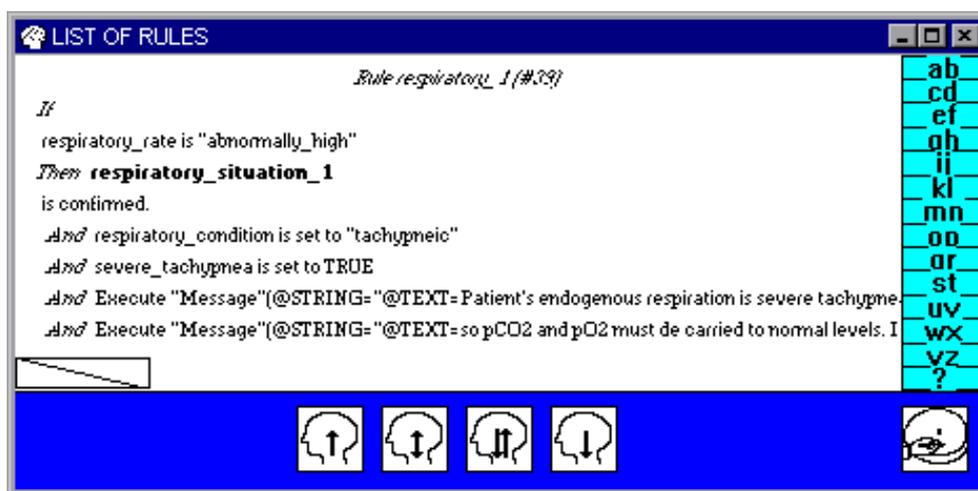


Figura 5-17: Regla de la base de conocimientos respiratorios

5.3.3.5 Terapia

Una vez evaluadas las bases de conocimiento diagnósticas, el mecanismo inferencial procesa las reglas terapéuticas del sistema, que tomando como entradas las interpretaciones diagnósticas obtenidas, evalúa el conocimiento y decide la terapia más conveniente para el enfermo: intubación/extubación, weaning, o incremento de la asistencia ventilatoria, aconsejando al clínico sobre los ajustes en la monitorización que

estime más convenientes. Para explicar la estructura de las bases terapéuticas es necesario definir qué significa en el contexto del sistema el concepto de condición ventilatoria. El objeto *condición ventilatoria* es el resultado de la evaluación de las condiciones gasométricas y hemodinámicas del paciente. A lo largo del proceso inferencial es posible que tome cinco valores diferentes que aparecen en la Tabla 5-3 con su interpretación

<i>Condición Ventilatoria</i>	<i>Interpretación</i>
Óptima	Supresión de la asistencia ventilatoria
Estable	Decrementar la asistencia ventilatoria
Aceptable	Mantener la asistencia ventilatoria
Sub-óptima	Incrementar la asistencia ventilatoria
Inestable	Ventilación totalmente controlada
Indeterminada	No hay información suficiente

Tabla 5-3: Recomendaciones de terapia ventilatoria

La base de conocimientos de terapia oxigenatoria, cuya estructura se muestra en la Figura 5-18, obtiene sus conclusiones terapéuticas a través de un proceso inferencial de dos pasos: en un primer paso considera la interpretación oxigenatoria del paciente, y en el caso de situaciones como *hipoxemia severa*, la interpretación hemodinámica, para luego, en un segundo paso, utilizando estos contextos y la condición ventilatoria definida para el paciente, establecer un incremento, una disminución o el mantenimiento del aporte oxigenatorio de los parámetros FiO_2 y/o PEEP.

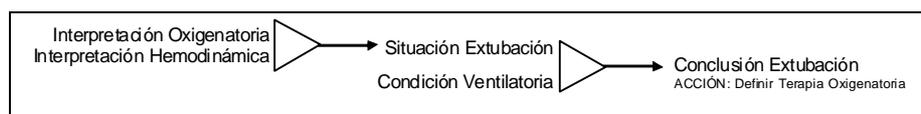


Figura 5-18: Estructura de la base de reglas de terapia oxigenatoria

La Figura 5-19 muestra una regla-ejemplo del sistema con la inclusión del nuevo valor de FiO_2 calculado para la condición particular del paciente.

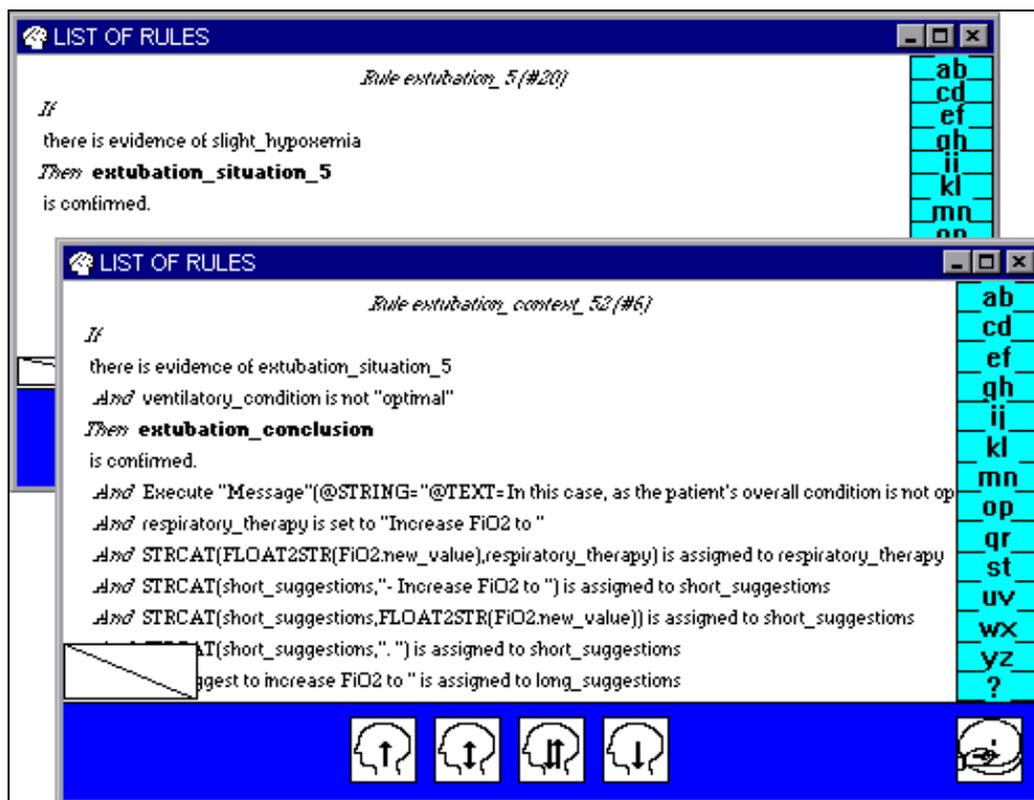


Figura 5-19: Regla-ejemplo de terapia oxigenatoria

La base de reglas de terapia ventilatoria actúa como punto final del proceso inferencial, recogiendo las conclusiones del resto de bases de reglas del sistema con el fin recomendar al clínico el mantenimiento, incremento o decremento de la asistencia mecánica o el inicio del proceso de *weaning*. Solamente en el caso de que la estabilidad de la condición respiratoria, hemodinámica y ventilatoria del enfermo sea la óptima, el sistema recomienda este destete. En el resto de los casos, se aconseja continuar con la terapia.

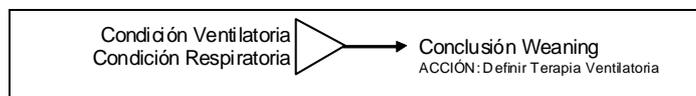


Figura 5-20: Estructura de la base de reglas de terapia ventilatoria

La Figura 5-20 muestra la estructura de la base de reglas y en la Figura 5-21 se observa una regla-ejemplo. El informe final que el sistema presenta al usuario contiene todas las recomendaciones y explicaciones que se han generado a lo largo del proceso inferencial con el fin argumentar sus decisiones.

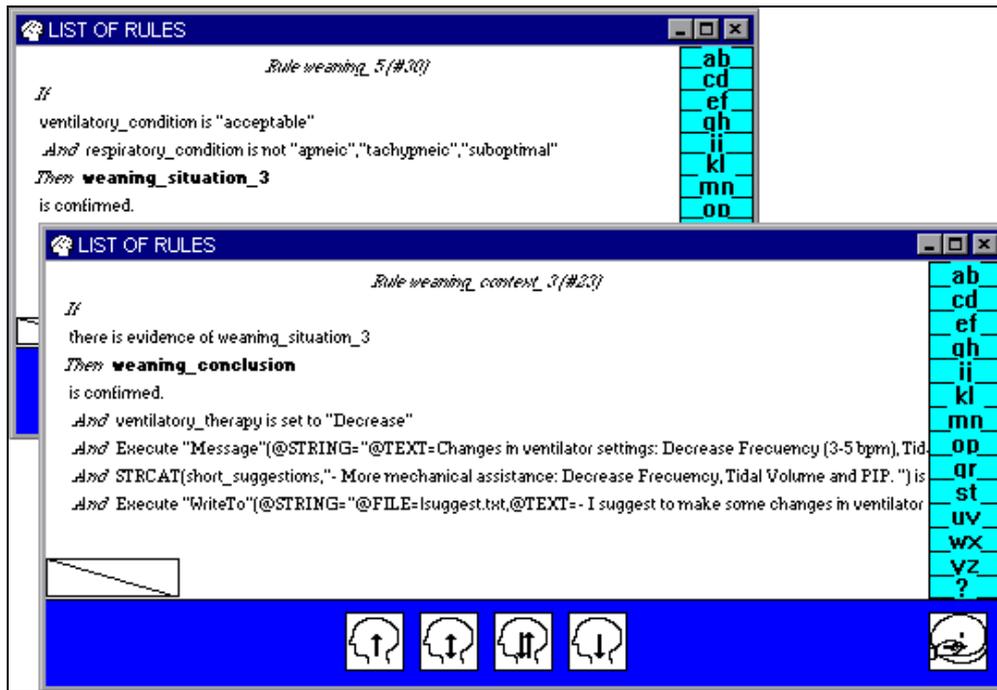


Figura 5-21: Reglas-ejemplo de la base de reglas de terapia ventilatoria

Toda la descripción realizada hasta ahora suponía que el estado del paciente era tal que la ventilación mecánica ya había sido recomendada y que había sido llevada a cabo. Sin embargo, es posible que en determinados casos, el estado del paciente sea tal que la ventilación asistida no sea necesario o que, por el contrario, ya hubiera destetado con anterioridad pero que su evolución recomendara de nuevo la asistencia. Para ello se diseñó una base de reglas auxiliar que contiene los criterios estandarizados de intubación y ventilación mecánica. Los *settings* sugeridos por el sistema aparecen en la Figura 5-22 y en la Figura 5-23 una regla-ejemplo.

I suggest the following ventilator settings:	
1. <i>FIO2</i>	= 100%
2. <i>Vt</i>	= 10 ml/kg
3. <i>IMV_AC= 30 Neonates</i>	= 30-15 Pediatrics
	= 15 Adults
4. <i>PEEP</i>	= 3-5 cm H2O
5. <i>Recheck Arterial Blood Gases</i>	15-20 mins.

Figura 5-22: Parámetros de asistencia ventilatoria recomendados



Figura 5-23: Regla-ejemplo que determina la necesidad de asistencia mecánica

5.4 Resumen

La representación de conocimiento en IA es una de las áreas claves para el desarrollo e implementación de sistemas inteligentes basados en conocimiento. El constructor o ingeniero de conocimiento debe tomar contacto con el problema, definiendo las entidades básicas y sus relaciones para, a continuación, seleccionar el material adecuado o lenguaje de representación que formalice las estructuras definidas o esquema de representación. Dicho esquema puede ser de dos tipos: declarativo, que hace énfasis en los aspectos estáticos del dominio, y procedimental, que se dirige a los aspectos dinámicos que describen cómo usar el conocimiento. Independientemente del esquema elegido, deberá ser capaz de representar, inferir e incorporar nuevo conocimiento y optimizar el proceso inferencial.

La herramienta de desarrollo Nexpert Object permite al ingeniero representar las entidades básicas del dominio y el conocimiento asociado en una estructura híbrida de reglas de producción, para el conocimiento dinámico, y clases y objetos, para el conocimiento estático. Los mecanismos de control para el razonamiento utilizan una estructura intermedia, la agenda, que organiza y dirige el foco de atención del problema seleccionando las hipótesis más relevantes del conjunto para ser evaluadas. La resolución de conflictos, la propagación hacia adelante de hipótesis, los contextos y el

encadenamiento hacia atrás así como la herencia de propiedades en clases y objetos contribuyen al procesamiento del conocimiento.

Mediante Nexpert Object se implementó una estructura de conocimiento modular, dividida en cuatro bases de reglas para diagnosticar y sugerir soluciones al manejo de pacientes dependientes de asistencia ventilatoria mecánica. Dichas bases de reglas determinan el estado del paciente en función de su balance ácido-base, hemodinámica, oxigenación y respiración, y sugieren una terapia oxigenatoria y ventilatoria adecuada a la severidad del caso clínico. En último caso, y si la situación fuera favorable, recomiendan la desconexión del equipo de soporte ventilatorio.

El sistema experto desarrollado forma parte conceptual del módulo heurístico, descrito en el capítulo anterior, y toma sus entradas simbólicas del módulo determinístico, conformando un sistema de monitorización inteligente para la gestión ventilatoria de pacientes. En el capítulo siguiente se describe la implementación final del sistema, haciendo especial hincapié en la arquitectura planteada.

6. ARQUITECTURA E IMPLEMENTACIÓN

*Hay dos formas de escribir programas libres de errores. Sólo la tercera funciona.
(Anónimo)*

*La programación es un carrera entre los ingenieros de software que se esfuerzan en construir programas mucho más grandes a prueba de idiotas, y el Universo que trata de fabricar más grandes y mejores idiotas. De esta forma, el Universo está ganado.
(Rich Cook)*

*Las seis etapas de la producción: (1)Entusiasmo salvaje, (2) Confusión Total, (3)Desesperación total, (4) Búsqueda del culpable, (5) Persecución del inocente, (6)Promoción del incompetente.
(Anónimo)*

6.1 Introducción

En los primeros días de la informática, los sistemas de información se desarrollaban usando técnicas de gestión orientadas al hardware porque era el factor principal del presupuesto en el desarrollo del sistema. Para controlar los costes del hardware, los gestores instituyeron controles formales y estándares técnicos, exigían un análisis y un diseño completo antes de que algo se construyera e incluso medían el proceso para determinar dónde podían hacerse mejoras. Sencillamente, aplicaban los controles, los métodos y las herramientas que hoy se reconocen como ingeniería del software. Por entonces, el software no era normalmente más que un añadido. En la actualidad, el panorama ha cambiado totalmente de tal forma que el software, y no el hardware, es normalmente el elemento principal a considerar en una distribución de costes. Las empresas que antaño pagaban a sus equipos de programadores para crear aplicaciones especializadas, ahora ofrecen a un tercero sus aplicaciones, y juntas forman el entramado de un negocio muy competitivo [78].

La disponibilidad del hardware de computación ha alcanzado muchos ámbitos de aplicación, traspasando las barreras del tradicionalismo en los usos y costumbres y constituyéndose en una herramienta de aplicación general. La asistencia sanitaria ha sido uno de sus máximos impulsores, aunque quizás por detrás de otras áreas, como la banca, las líneas aéreas y la fabricación. Si bien la tecnología de este tipo acaparó todos los

beneplácitos en tareas administrativas, más tarde amplió sus horizontes, llegando incluso hasta el campo quirúrgico, en el que las operaciones asistidas por ordenador representan el penúltimo logro. En último término, la irrupción de Internet acapara buena parte de los desarrollos actuales, orientados hacia una nueva era de la información (¿la última?), una información compartida, accesible desde cualquier punto y para todos los públicos.

En el capítulo 4 de la presente memoria se ha presentado un análisis de los requisitos para el desarrollo de un sistema de monitorización inteligente en el entorno de cuidados críticos. Las correspondientes restricciones venían impuestas, bien por el propio sistema, o bien por el entorno de aplicación y los usuarios potenciales. Además, se planteaba un modelo de diseño conceptual en el que tres módulos desarrollan las tareas propias del sistema: el módulo determinístico, ligado a las actividades de recogida y procesado de datos; el módulo heurístico, encargado del manejo inteligente del sistema; y el módulo de control, articulador y organizador del esquema. En este punto, el ingeniero de software posee toda la información disponible del nuevo sistema y sus restricciones, y puede acometer la tarea de implementación, eligiendo para ello una arquitectura adecuada y unas herramientas de desarrollo flexibles y a la vez potentes.

6.2 La arquitectura Cliente-Servidor

Las aplicaciones potenciales de un sistema de monitorización en el entorno clínico han sido expuestas en capítulos precedentes. La posible informatización de otras áreas hospitalarias, y la necesidad de integrarlas en una única red, también ha sido un tema debatido. Sin embargo, todavía no se ha definido qué posible arquitectura de sistema debe tener una aplicación para este entorno, y cómo ha de integrarse con el resto de sistemas de información clínicos.

En el capítulo 2 se apuntaban a grandes rasgos las funciones básicas que debería cubrir la implantación de una configuración como la que hacía referencia la **Figura 2-4** en una Unidad de Cuidados Intensivos. Partiendo de este concepto existen tres modelos alternativos para desarrollar un sistema integrado como el que se propone: el modelo centralizado, el modular, y el distribuido [99]. En teoría, cada una de estas arquitecturas proporcionan el mismo abanico de funciones, e incluso desde el punto de vista del usuario, las diferencias no son tan obvias. Sin embargo, desde el punto de vista del

constructor software que diseña, desarrolla y mantiene el sistema, las diferencias están muy marcadas. La elección de una determinada arquitectura afecta a la elección del hardware y el software necesarios, y por ello hay que considerarla en el contexto de las necesidades actuales del entorno y los usuarios del sistema.

Una *arquitectura centralizada* se basa en la existencia de un sistema central que lleva a cabo todas las tareas de procesamiento y gestión de la información. La interacción del usuario con el sistema se realiza a través de terminales de propósito general. Una de las grandes ventajas de este tipo de sistemas es la facilidad para integrar y comunicar la información, mientras que entre sus inconvenientes sobresalen la difícil tarea del mantenimiento, la ampliación del sistema y la incapacidad para acomodar las diversas necesidades de los usuarios.

Por otra parte, la ya mencionada disminución del coste hardware y las mejoras software trajeron consigo el advenimiento de los *sistemas modulares*, en los que distintos módulos de la aplicación software llevan a cabo tareas específicas, mientras que un esqueleto común define los interfaces que permitirán compartir datos entre los módulos. Así pues, los módulos pueden diseñarse para responder a necesidades particulares de áreas específicas y su modificación es más sencilla que los sistemas centrales, porque el alcance del problema que resuelven es más pequeño. El precio que hay que pagar es el de la integración de datos y la comunicación entre los módulos.

Con el desarrollo de la tecnología de redes de comunicaciones aparecieron los *sistemas distribuidos* durante 1980 que, sencillamente, consisten en una federación de computadoras independientes que han sido configurados para resolver problemas específicos en áreas de aplicación concretas. Todos ellos operan de forma autónoma y comparten datos, aplicaciones y otra serie de recursos a través del intercambio de información sobre redes de área local usando un protocolo estándar de comunicaciones. Los Sistemas de Información Hospitalarios actuales (HIS) deben constituirse como un sistema de comunicación entre departamentos, distribuyendo el procesamiento de información y facilitando su integración. La materialización física de los sistemas distribuidos se concreta en las *arquitecturas cliente-servidor*.

6.2.1 Conceptos preliminares

De un modo informal, la computación cliente-servidor se refiere a un modelo computacional en el cual dos o más computadoras interactúan de tal modo que una proporciona servicios a la otra, como refleja la Figura 6-1 [100]. En principio, y a tenor de lo expuesto en el análisis de requerimientos del Capítulo 4, este tipo de servicios son los que reclama la implementación de un sistema de monitorización en el entorno de cuidados intensivos.

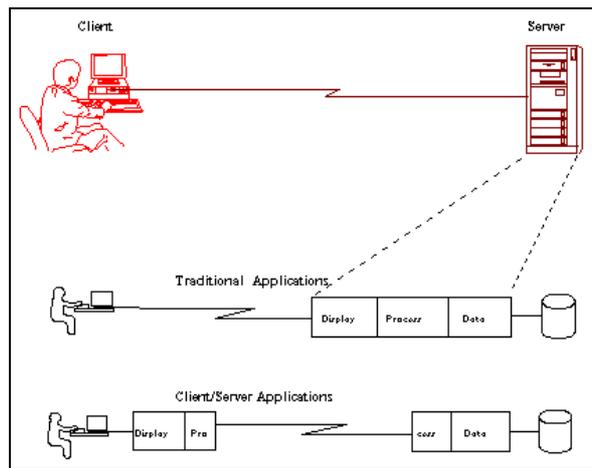


Figura 6-1: Aplicaciones tradicionales vs aplicaciones cliente-servidor

Formalmente, la filosofía cliente-servidor es una arquitectura computacional en la cual los procesos llamados *clientes* requieren determinados tipos de servicios de los procesos llamados *servidores*. Los servicios abarcan solicitudes de datos a la base de datos, impresión de documentos, ejecución de aplicaciones y se gestionan en uno o varios servidores que atienden las peticiones de los clientes y, en determinados casos, permiten que el procesamiento pueda distribuirse. En la Figura 6-2 aparecen dos ejemplos de servidores de bases de datos y aplicaciones.

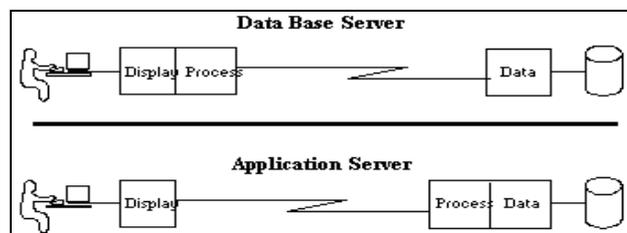


Figura 6-2: Ejemplo de servicios en una arquitectura cliente-servidor

El cliente es un proceso (programa) que envía un *mensaje* al proceso servidor (programa), requiriéndole que ejecute una tarea (servicio). Los programas cliente

normalmente ejecutan tareas de gestión de la interfaz gráfica de usuario de la aplicación, examinan y validan la entrada de datos por parte del usuario, envían peticiones a los programas servidor, y algunas veces ejecutan procedimientos de la aplicación objetivo del sistema. El proceso cliente es el *front-end* de la aplicación que ve el usuario y con la que interactúa, es la interfaz con el resto del sistema e implementa cierta parte de la lógica específica de la solución. Gestiona sus propios recursos locales, como puede ser un monitor, un teclado y sus periféricos. Una parte importante que merecerá especial atención por parte del ingeniero es el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI), medio de acceso al sistema completo, que gestionará el sistema operativo. Por otra parte, el servidor satisface las peticiones del cliente ejecutando la tarea requerida, gestionando las bases de datos, el sistema de ficheros y la red de comunicaciones, además de facilitar el acceso a los recursos compartidos [101]. La Figura 6-3 muestra esquemáticamente la división organizativa de tareas.

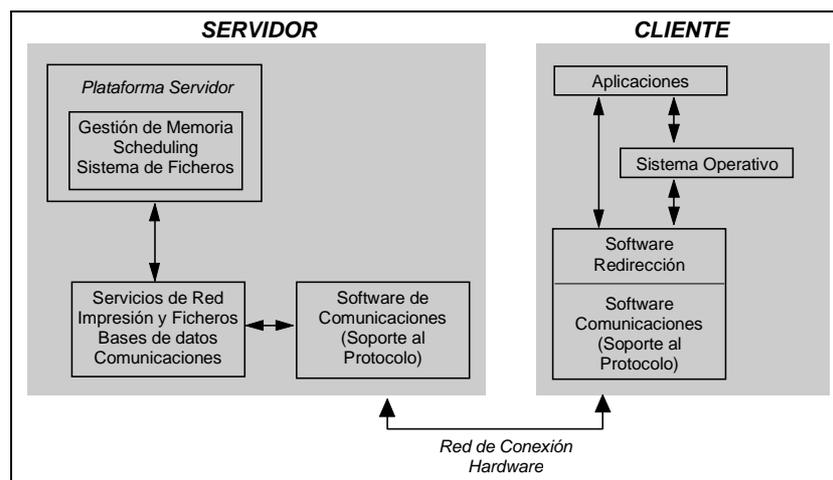


Figura 6-3: División de tareas en arquitecturas cliente-servidor

Una característica importante que avala la computación distribuida es la posibilidad de incorporar diferentes plataformas hardware, y distintos sistemas operativos en clientes y servidores, sin que ello repercuta en la integración o en la comunicación. De esta forma cada aplicación cliente puede diseñarse e implementarse teniendo en cuenta las características del sistema operativo y la plataforma hardware sacando el mayor partido de la interfaz gráfica.

A diferencia de lo que en un principio pudiera parecer, la computación cliente-servidor no es un paradigma software de nueva factura, sino que más bien representa un

camino de evolución que parte de la programación estructurada, discurre a través del diseño modular, y llega más allá del concepto software de librería dinámica [102].

6.2.2 Aplicación al dominio del problema

El establecimiento de requisitos y diagrama de contexto de la Figura 4-4 puede servir como referencia a la hora de comprobar si la arquitectura cliente-servidor se adapta al desarrollo de un sistema de información en el entorno UCI [45]. En primer lugar existen una serie de fuentes de información, como son el paciente, los equipos de monitorización y las bases de datos. En segundo lugar, se tiene un conjunto de consumidores de información, que realizan esta tarea con diferente nivel de detalle, como es el personal clínico. En tercer y último lugar, se considera el sistema de información que hay que instalar, y cuya misión no es otra que servir como puente de comunicaciones entre ambos. Así pues, se debe asociar un hipotético módulo cliente en el origen de las fuentes de información, con tareas definidas de recolección, visualización y preprocesado de datos; un módulo servidor encargado de la gestión y coordinación de los clientes, con capacidades de gestión de bases de datos y procesamiento inteligente de la información; y, por último, una red de datos que sirva de transmisor entre los centros emisores y los centros receptores. A continuación se describen con más detalle estas asociaciones.

Modulo Cliente

En el entorno de cuidados intensivos se genera gran cantidad de datos, no sólo de tipo administrativo, sino a partir de la instrumentación biomédica que se encuentra conectada al paciente. La UCI es un área de producción ingente de datos, que se encuentran sin procesar, sin integrar, sin resumir. Estos datos no constituyen lo que en el Capítulo 1 se entendía por información. La Figura 6-4 representa esta situación, en la cual el paciente se encuentra conectado a multitud de instrumentación, no solo de medición, sino también de actuación y gestión ventilatoria, manejada fundamentalmente por personal de enfermería, siguiendo las recomendaciones clínicas. Es por tanto un área de adquisición de datos, de procesamiento y de asistencia clínica rutinaria.

Con el fin de dotar al sistema de información con mayores prestaciones, el módulo cliente engloba dos componentes: por un lado la instrumentación biomédica, que permite la medición de las variables de fisiología básicas que permiten la estimación del

estado del paciente; y por otro lado, una computadora *front-end*¹⁵, normalmente un PC, que controle el funcionamiento de la otra parte, efectúe tareas de recogida de datos y preprocesado simbólico, analice y visualice dichos datos, y sea responsable de su envío al módulo servidor. Considerando la estructura modular propuesta en el Capítulo 4 para un sistema de monitorización, algunas de estas funciones están incorporadas en el módulo determinístico propuesto. En este punto, se puede definir la **estación local** como un conjunto de dos subsistemas: un subsistema de instrumentación, compuesto por los monitores del paciente, y un subsistema computacional, que incorpora el módulo determinístico. Por ello, para cada paciente de la UCI, será necesario instalar una estación local a pie de cama, que es el punto dónde se originan los datos.

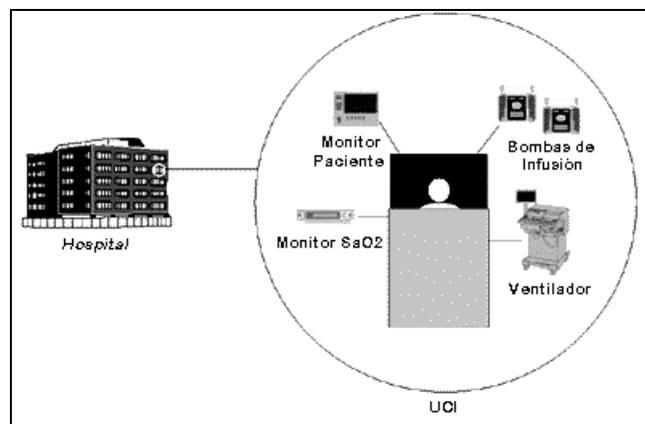


Figura 6-4: Paciente UCI, fuentes de datos y sistemas de soporte

Módulo Servidor

Una vez definidas las *islas* de automatización que son las estaciones locales (paciente-instrumentación-ordenador), es necesario integrar las fuentes de datos y proporcionar mejoras substanciales a la tarea de diagnóstico médico, descrita en el Capítulo 2. El módulo servidor o **estación central**, es una estación de trabajo tipo SUN, que lleva a cabo las siguientes tareas: (1) gestión de la base de datos, en lo referente a toda la documentación clínica generada (variables numéricas, señales fisiológicas, informes de laboratorio, etc.), (2) gestión de la red de comunicaciones que interconecta las *islas* con el servidor, (3) integración, visualización y presentación de información, es

¹⁵Pequeño computador, en este caso un PC, que descarga a la estación central de algunas de las tareas de entrada/salida y comunicaciones, y que sirve como punto de acceso a una parte del sistema.

decir, manejo de la interfaz gráfica, y (4) control del sistema. Sin embargo, y para dotarlo de capacidades adicionales, como las que han sido descritas en la aproximación modular propuesta, se incorpora el módulo heurístico. De este modo, la parte inteligente del sistema de información reside en la estación central, se ejecuta como una aplicación más y visualiza sus conclusiones en la interfaz gráfica del servidor.

Dado el volumen de información que está disponible en la estación central y considerando que actúa como un centro de control, resulta obvio restringir el acceso de los usuarios al sistema. Normalmente, los usuarios que interactuarán con el servidor serán los clínicos de mayor experiencia en la unidad, quienes una vez evaluada la información y convenientemente aconsejados por la parte inteligente del sistema, decidirán la terapia adecuada al caso y, eventualmente, actuarán sobre el centro de control del sistema, ya sea modificando los parámetros de muestreo de la estación local, o bien cambiando los settings de un hipotético aparato, etc.

Comunicaciones

La implementación física de una arquitectura cliente-servidor necesita un medio de transmisión por el cual tenga lugar la comunicación entre procesos del cliente y procesos del servidor; en este caso, las estaciones locales y la estación central. El medio o red de comunicaciones es el canal por el que discurre el intercambio de mensajes entre las aplicaciones. Considerando la arquitectura elegida y en el estado actual de la tecnología, se ha elegido una red Ethernet, tipo predominante en redes de área local, con un protocolo de comunicaciones TCP/IP. La razón de elegir dicho protocolo estriba en que es un estándar de facto, adoptado hoy en día en la red de redes (Internet) para la intercomunicación entre computadoras de tecnologías y sistemas operativos diferentes, e incluso de distintas marcas. Además, y como se verá más adelante, proporciona un medio de comunicación fiable y libre de errores.

TCP/IP es un conjunto de protocolos desarrollados para el trabajo cooperativo de ordenadores que comparten recursos a través de una red. Proporcionan las funciones de bajo nivel necesarias para dotar de capacidad de comunicación a las aplicaciones. El modelo computacional cliente-servidor utiliza este protocolo como esqueleto de comunicaciones. La Figura 6-5 muestra la estructura en niveles del conjunto de protocolos [103].

La característica más sobresaliente de este protocolo es que proporciona un medio de comunicación fiable entre dos puntos, ocupándose de dotar de conexión a las aplicaciones, regulando el flujo de información y dividiéndolo en paquetes de datos, asegurando que llegan sin error y de forma ordenada al otro lado de la conexión. Se pueden distinguir dos tipos de transporte: (a) orientado a la conexión, es decir, que garantiza la secuencialidad de los paquetes y la retransmisión en caso necesario, y (b) no orientado a la conexión, en el cual ni hay garantía de la secuencialidad ni de la recepción. El primero se le denomina TCP (*Transmisión Control Protocol*) mientras que el segundo se le conoce como UDP (*User Datagram Protocol*). Obviamente, dada la arquitectura propuesta y los servicios que se van a implementar, es necesario un mecanismo fiable de intercambio de mensajes. El protocolo IP, definido en la capa de red o capa de comunicación entre máquinas, acepta las peticiones del nivel de transporte relativas al envío de paquetes y es responsable de determinar el camino hasta la máquina destino, la cual se identifica en la petición a través de la denominada *dirección IP*, única para cada ordenador en la red. Una vez localizado el destino, particiona el paquete de datos y lo envía a la interfaz de red. En la recepción, valida los paquetes y los envía a la capa superior para ser procesados. Por último, la interfaz hardware es el nivel más bajo del software TCP/IP, y se encarga de aceptar paquetes IP, encapsularlos y transmitirlos a través de una red específica, como puede ser una Ethernet.

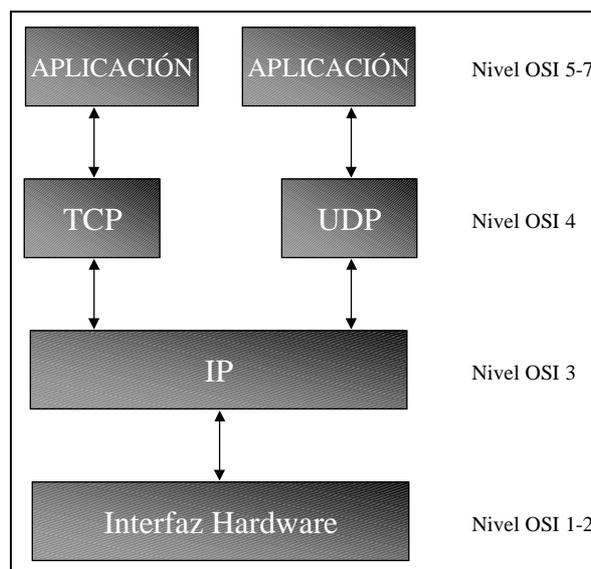


Figura 6-5: Niveles OSI de la estructura de protocolos TCP/IP

Como se había apuntado anteriormente, la finalidad del modelo cliente/servidor es dar servicio a las peticiones de los clientes. Esta tarea, que se realiza de forma concurrente bajo el protocolo TCP, sigue los siguientes pasos [104]:

1. Esperar la llegada de una petición del cliente.
2. Iniciar un nuevo servidor para gestionar esta petición, creando un nuevo proceso o tarea (este paso ya depende del sistema operativo). Este servidor maneja totalmente la petición del cliente, y cuando logra el resultado deseado envía la respuesta de vuelta y finaliza.
3. Volver al paso 1.

Así, un mismo servidor puede manejar a la vez múltiples peticiones de clientes para la conexión o para dar un servicio, y puede responder a cualquier petición independientemente del resto de clientes.

La implementación de un servicio requiere que el servidor, por medio de una aplicación construida usando el API¹⁶ del TCP/IP, *escuche* en un determinado *puerto* de comunicaciones. A dicho puerto deben dirigirse las solicitudes de los clientes por medio de otra aplicación. Existen una serie de puertos bien conocidos que prestan una serie de servicios determinados, como pueden ser FTP, TELNET, SMTP, etc., mientras que para la definición de nuevos servicios se utilizan otro tipo de puertos, conocidos como *efímeros*.

Para el establecimiento de los servicios, la lectura y escritura de datos en los puertos y demás tareas requeridas para la comunicación, es necesario el uso de los llamados *sockets*. Este paradigma, popularizado en la distribución de software Berkeley (BSD) del sistema operativo para máquinas UNIX, ha sido adoptado también en el mundo PC. Es una generalización del mecanismo UNIX de acceso a ficheros que proporciona un punto final a la comunicación. La creación de una conexión entre el servidor y un cliente se representa gráficamente en la Figura 6-6. Cuando el servidor desea establecer un servicio, crea un *socket* que liga a un puerto determinado de la máquina y espera por alguna conexión (paso A). Por su parte el cliente crea otro *socket*

¹⁶ Siglas de *Application Program Interface*, librería de rutinas de programación que acceden a las funciones implementadas en el protocolo TCP/IP.

que conecta al puerto y a la dirección del servidor que le van a dar el servicio (paso B). Si el servidor acepta la conexión, crea un nuevo *socket* que dará servicio al cliente (paso C).

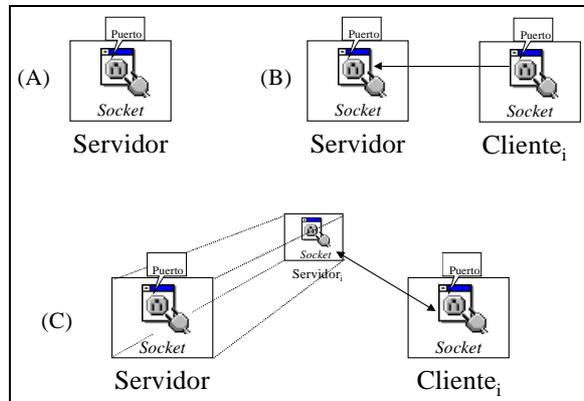


Figura 6-6: Pasos básicos del establecimiento de conexión a través de *sockets*

Una vez establecida la conexión, el flujo de datos entre máquinas se realiza por medio de sencillos procesos de lectura y escritura en los propios *sockets*, que de esta forma se comportan como ficheros. Por ejemplo, en cada una de las aplicaciones de ambos extremos será necesario definir rutinas que detecten flujos de entrada de datos, para así responder adecuadamente como se verá más adelante.

En cuanto a la fin de la comunicación, el proceso puede tener lugar en cualquier momento, y es el protocolo el encargado de notificarlo al otro extremo, ya sea al servidor o al cliente. El significado es bien distinto, porque mientras que en el primer caso se termina el proceso servidor creado exclusivamente para dar servicio al cliente, en el segundo finaliza el servicio completo.

Así pues, con la utilización del paradigma socket para el flujo de información entre dos cualesquiera sistemas que utilicen el mismo protocolo TCP/IP es posible construir un conjunto de aplicaciones que soporten las tareas asignadas a los módulos cliente y el módulo servidor y que gestionen el funcionamiento del sistema globalmente. En los apartados siguientes aparecen descritas dichas aplicaciones, cómo se integran en las estaciones y cómo es el paso de mensajes entre sistemas.

6.3 Estación Local

6.3.1 Introducción

La implementación física de la arquitectura cliente-servidor planteada anteriormente reconoce el papel preponderante que juegan las comunicaciones. Así pues, el diseño de la estación local debe incluir una capa de comunicaciones que permita a la aplicación cliente acceder al sistema global, enviar/recibir flujos de información en forma de mensajes del servidor y utilizar los recursos compartidos. Estos mensajes que circulan por la red de comunicaciones constituyen el vocabulario básico con el cual cliente y servidor se entienden y comprenden. El tipo de mensaje abarca desde mensajes de configuración y modificación de valores de parámetros hasta solicitudes de conexión al sistema.

Debido a la distribución de tareas que propone la arquitectura, la estación local controla directamente la instrumentación conectada al paciente, sirviendo de esta forma como un centro local de preproceso de información, que luego se envía a la estación central, a través de la interfaz de comunicaciones, para que sea integrado con el resto de información disponible. Por ello, la estación cliente debe manejar el aspecto temporal que implica el muestreo y recogida de datos.

Otro punto importante de la implementación es el diseño de la interfaz gráfica, no sólo en lo relativo a la visualización de información, que debe adecuarse al tipo de usuario que va a interactuar en este punto de acceso al sistema, sino en lo relacionado con la configuración de la propia estación, que se realiza a través de la pantalla pertinente.

Muy relacionado con la interfaz gráfica se encuentra el concepto de evento. El evento puede definirse como cualquier suceso puntual que obliga al sistema a reaccionar para adaptar su función a la nueva situación definida. La programación basada en eventos se implementa de una forma muy sencilla, asociando un *handler*¹⁷ a cada evento de forma que este código implemente su operación. La Figura 6-7 representa gráficamente la filosofía en que está basada este tipo de programación. En un sistema como el que se propone, hay dos desencadenantes posibles de este tipo de suceso: los

¹⁷ Manejador, rutina software asociada al evento.

usuarios y el paciente. El paciente es una fuente constante de información, ya sea como valores numéricos o como nuevos estados que definen una terapia diferente. Pero dicha información, evaluada conjuntamente, puede determinar por ejemplo una condición de alarma, evento que debe comunicarse al clínico quién será el encargado de realizar las acciones oportunas con el fin de eliminar las causas que motivaron la activación de la alarma. Este tipo de eventos, tal y como se veía en el Capítulo 4, llevan implícita una carga temporal.

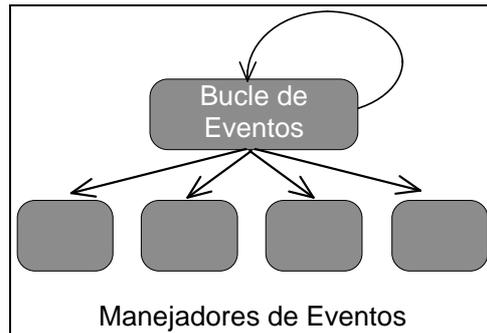


Figura 6-7: Filosofía general de la programación orientada a eventos

Otro tipo de eventos son los ocasionados por los usuarios que interaccionan con el sistema a través de la interfaz gráfica generando eventos gráficos, ante los cuales el sistema debe reaccionar ajustando el tamaño de una ventana, visualizando una zona diferente, por ejemplo de la señal de frecuencia cardíaca o simplemente *refrescando* la pantalla gráfica. Además, y a causa de que la configuración del sistema debe realizarse a través de esta interfaz, los eventos de tipo gráfico podrán causar a su vez otros eventos en el sistema. Por ejemplo, en el caso de la estación local, generarían eventos de comunicaciones en la parte servidor de la arquitectura. La estación central, por su parte, originará estos eventos en la estación local a través de procesos de configuración llevados a cabo por el clínico en el servidor.

La Figura 6-8 representa el diagrama de bloques de la estación local en el que aparecen sus componentes y la interconexión entre ellos. Se puede observar que el elemento central es un módulo de control que actúa como procesador de eventos, evaluando y ejecutando la tarea asignada a la ocurrencia, y también como controlador temporal, ya que debe actuar sobre la instrumentación con el fin de ajustar la adquisición de datos a la situación clínica del enfermo.

La implementación ha sido desarrollada con la herramienta de programación Delphi 2.0 [105], que permite el diseño fácil de la interfaz gráfica, la programación de eventos y la implementación de sockets.

Tomando en consideración el diagrama, a continuación se describen dichos componentes, sus entradas y salidas de datos, así como la lógica del proceso que desarrollan.

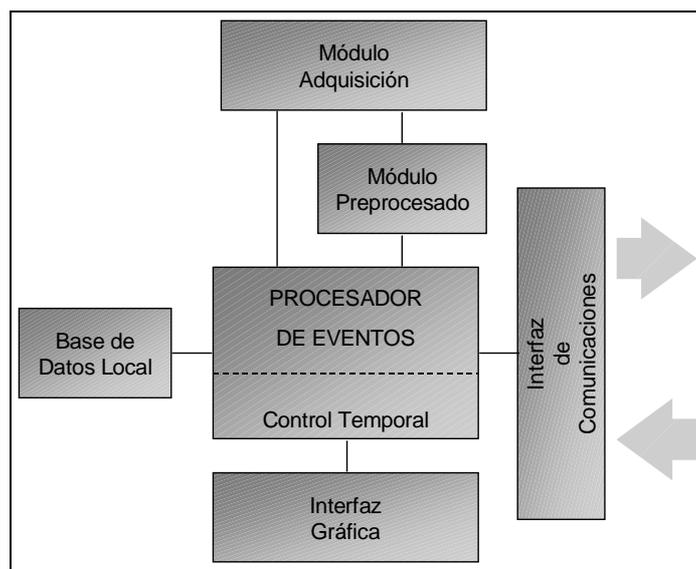


Figura 6-8: Diagrama de bloques de la estación local

6.3.2 Adquisición de datos

El módulo de adquisición de datos está dedicado a la tarea de recogida de datos de la instrumentación biomédica conectada al paciente. Dicha instrumentación está dedicada a obtener del paciente todos los datos relativos a su fisiología que permitan al médico tener la suficiente información como para obtener un cuadro clínico de su enfermedad. Entre esta instrumentación se pueden citar los monitores fisiológicos y los equipos de asistencia ventilatoria.

Como ya se indicó en el Capítulo 1 uno de los problemas fundamentales en la interconexión entre equipos de monitorización y equipos informáticos es la falta de un estándar de comunicaciones que permita la adquisición de datos independiente del equipo. Ante la ausencia de un método comúnmente aceptado, cada aplicación debe adaptarse a las características de la instrumentación particular. A pesar de ello, el estándar de comunicación serie digital RS-232-C es un protocolo de acceso bastante

extendido y a través del cual es posible acceder a gran parte de los datos que puede ofrecer un monitor biomédico. La ventaja principal reside en la disponibilidad de datos en formato digital, mientras que, y a tenor de las características usuales de este tipo de monitores, presenta como desventaja que el flujo de información no es continuo, ya que es el propio monitor el que realiza la tarea de muestreo y empaquetamiento de datos. A partir de aquí la responsabilidad en la adquisición de estos datos recae sobre la computadora que debe establecer los intervalos temporales adecuados. Todo ello plantea serias dudas de la utilidad de este tipo de monitores con otro tipo de pacientes y otro tipo de sintomatologías, por ejemplo, si ha de estudiarse la morfología de las ondas cardíacas. En este caso es necesario conectar el equipo a la salida analógica del dispositivo, si es que existiera, ya que permite la adquisición de datos en tiempo real y puede ser controlada directamente por la computadora.

La comunicación entre el módulo de adquisición y la interfaz RS-232-C del monitor se realiza en base a mensajes [106]. Sin embargo, y a diferencia de lo que implicaría la definición de un estándar de intercomunicación, el formato y significado de los mensajes varía dependiendo del tipo de monitor, con lo cual la construcción del módulo de adquisición debe dedicar una parte al diseño *ad hoc* de la comunicación de bajo nivel. Un estándar de comunicación definiría no sólo la conexión hardware sino el protocolo software de comunicaciones. En el problema que nos ocupa, el significado y tipo de mensajes que pueden establecerse entre el monitor el módulo de adquisición escapa al objetivo de esta tesis. A pesar de ello, básicamente se pueden establecer tres tipos de mensajes: solicitud/envío de valores de parámetros, solicitud/envío de formas de onda y mensajes de error. En todos los casos, el protocolo de comunicaciones del propio monitor define cómo es la estructura del mensaje de datos y como hay que descomponerlo para extraer la máxima información posible.

El capítulo 4, en su apartado dedicado a la exposición del diseño modular, fueron descritas las tareas asignadas al módulo de control temporal y se definían conceptos como *persistencia* de una variable y *tiempo de decisión* que gobernaban el proceso de monitorización. Dichos conceptos alcanzan aquí su verdadera importancia, ya que determinan los tiempos de adquisición de datos con las limitaciones impuestas a nivel de señal. La persistencia de una variable, definida para un paciente particular, determina los intervalos de adquisición de datos para esa variable, mientras que el tiempo de

reevaluación determina en qué momento el módulo de adquisición debe requerir un muestreo general de todos los parámetros del paciente. Cuando se reciben estos datos, se envían a través de la interfaz de comunicaciones a la estación central para que los visualice si así fuera necesario y los almacene en un nuevo registro de paciente.

Los valores de persistencia y tiempo de decisión son específicos para el paciente y pueden ser definidos y/o modificados por el clínico en la estación central. De esta forma, en cada estación local existe una estrategia de monitorización diferente, que se define a través de los distintos valores de persistencia y tiempo de decisión. Pero el momento en el cual estos valores son transmitidos a la estación local es diferente, porque mientras los primeros son específicos para cada señal y se definen en el momento en que el cliente le hace explícito al servidor su disponibilidad, el segundo se establece al inicio de la conexión entre cliente y servidor.

El algoritmo lógico que implementa el módulo de adquisición es el siguiente:

1. Inicialización del puerto de comunicaciones definiendo la velocidad de transmisión, bits de datos, bits de stop, paridad y puerto por el cual realizar la conexión.
2. Obtención de parámetros disponibles del monitor.
3. Informar al servidor del parámetro. El servidor por su parte devuelve para cada señal su persistencia y límites de alarma definidos.
4. Inicialización de timers para cada una de las señales disponibles.
5. Esperar hasta que se genere un evento temporal, es decir, al agotarse el primer timer.
6. Obtener identificador de la variable que generó el evento, componer el mensaje de solicitud de envío del nuevo valor y resetear el timer correspondiente.
7. Comunicar el nuevo dato a la estación central.
8. Volver al paso 5.

Sin embargo hay que tener en cuenta que, a tenor de lo expuesto en el capítulo 4, existen dos tipos de eventos temporales que no están incluidos en este algoritmo y que implican los pasos 6 y 7, como son la finalización del intervalo de tiempo de decisión y

el disparo de una alarma. En el primer caso, se generan tantos mecanismos de adquisición de nuevos valores como parámetros hayan sido notificados al servidor en el paso 3, se comunican sus valores al servidor y se restauran sus correspondientes timers, además del timer asociado al tiempo de decisión. En el segundo caso, existe una lectura del valor de un parámetro que ha superado los límites definidos para dicho parámetro, lo cual inmediatamente se comunica a la estación central. La alarma provoca una reacción del sistema que reevalúa globalmente al paciente, con lo cual todos los timers asociados a las variables, así como el correspondiente al tiempo de decisión son reseteados.

6.3.3 Preprocesado Simbólico

La Figura 6-9 representa el flujo de información que se establece entre los subsistemas de adquisición y preprocesado de datos y el módulo de control. Dichos flujos difieren en su contenido y significado, porque mientras la adquisición sólo devuelve datos numéricos, el módulo de preprocesado simbólico obtiene el literal asociado a dicho valor, en función del tipo de paciente y la situación clínica que presenta, especificada a través de los valores límites de normalidad para ese valor. Para el módulo de control se reservan flujos más específicos como pueden ser los límites de los valores de los parámetros y acciones de control sobre la adquisición en lo relacionado con la gestión de los timers y los procesos que ejecutan.

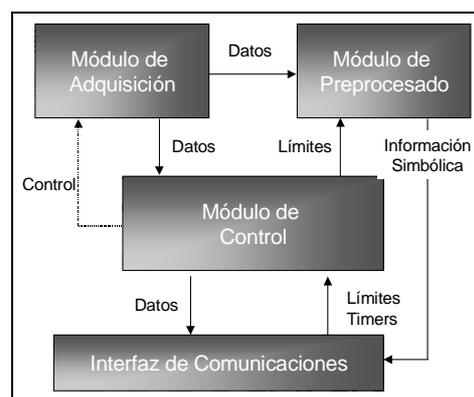


Figura 6-9: Flujo de datos entre los módulos de la estación local

Los fundamentos teóricos del procesamiento simbólico han sido ya tratados en el capítulo 4. Sin embargo sí es necesario comentar que la definición de los rangos de valores de normalidad para cada una de las variables del paciente es un proceso que tiene lugar en la estación central a cargo del clínico autorizado. La modificación de cualquier valor influye en la categorización simbólica de los datos del paciente

monitorizado, por lo tanto el acceso debe ser restringido. El servidor, una vez que el clínico realiza la modificación, se encarga de configurar la tarea de procesamiento simbólico de cada uno de sus clientes transmitiendo dicha modificación en un mensaje de configuración. A causa de que lo único que cambia es el criterio de traducción simbólica, la estrategia temporal continúa sin modificaciones.

6.3.4 Módulo de Control

El módulo de control cumple la tarea de organizar la adquisición de datos y gestionar las comunicaciones con el servidor. Se pueden distinguir dos componentes principales: el procesador de eventos y el control temporal.

El procesador de eventos basa su funcionamiento en la detección de los tres tipos de eventos anteriormente mencionados: temporales, gráficos y de comunicaciones. La Figura 6-10 representa el algoritmo que implementa la función. Para cada tipo de evento existe un proceso diferente que maneja la tarea asociada, con lo cual la identificación del tipo de evento no es necesaria. El caso de los eventos temporales ya citados, se resuelve a través de la herramienta de programación que permite la creación dinámica de timers y su asociación con una rutina que se ejecuta cuando se dispara el timer, es decir, al término del cómputo del tiempo especificado. En el caso de que se manifieste una alarma y haya que reevaluar al paciente el contador del timer se resetea y vuelve a comenzar.

Los eventos de comunicaciones tienen un tratamiento diferente, ya que la capa de comunicaciones se encarga de vigilar la conexión esperando por un flujo de entrada de datos. Cuando esto ocurre, es responsable de particionar el mensaje y de generar los eventos correspondientes: modificación de los límites de alarma, envío de registro de paciente, tiempos de reevaluación, etc.

Por último, los eventos gráficos son gestionados directamente por la herramienta de programación y se refieren a manejo de botones, visualización de ventanas, etc. Los procedimientos de configuración que permiten modificar ciertos aspectos de la interfaz en la estación local, como puede ser la visualización de las señales, la conexión al servidor, etc. pueden a su vez disparar otros eventos gráficos, que igualmente son manejados por la herramienta.

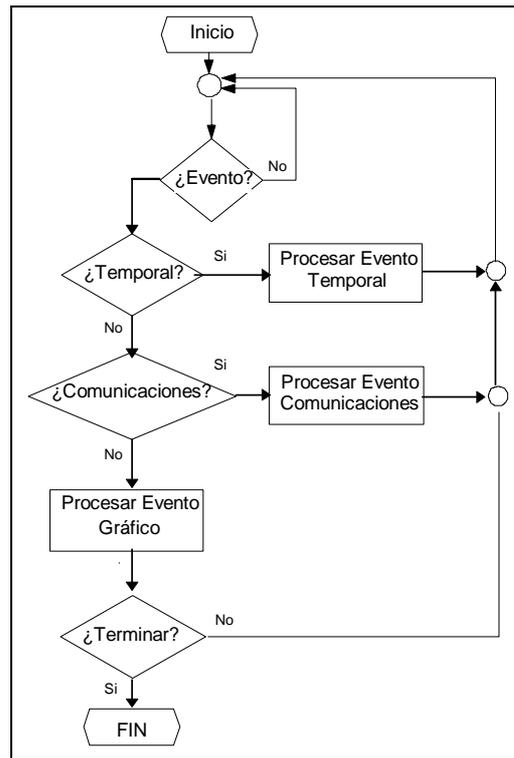


Figura 6-10: Diagrama de Control del Procesador de Eventos

Por otra parte, el control temporal de la estación local se encarga de configurar la estrategia de adquisición de datos en función de las variables de persistencia y tiempo de decisión transmitidas desde el servidor. Es decir, se encarga de activar los timers correspondientes que generen los eventos temporales de adquisición de valor y reevaluación de paciente ya comentados. Además, y como se mencionaba en el capítulo 4, debe realizar un pequeño análisis de tendencias para determinar si en un momento dado, y teniendo en cuenta la progresión de un parámetro dado, es posible que en breve plazo se produzca una situación de prealarma. En suma, se encarga de ejecutar reglas como la de la **Figura 4-17** que verifican lo anterior. En caso de que la situación de prealarma se confirme, informa de ello al módulo de comunicaciones para que envíe un mensaje adecuado al servidor.

6.3.5 Comunicaciones

La interfaz de comunicaciones de la estación local puede considerarse como la puerta de entrada al sistema y único medio de comunicación entre cliente y servidor. En un apartado anterior se ha descrito el protocolo de comunicaciones TCP/IP que gestiona las operaciones a bajo nivel, incluidas aquellas que se encargan de gestionar la red, es

decir, el sistema operativo de red. Sobre él se diseña una capa de aplicación que contiene todos los procedimientos de intercambio de mensajes entre la estación local y la estación central que posibilitan el funcionamiento del sistema de monitorización y, consecuentemente, el sistema completo.

La intercomunicación de equipos necesita de una representación uniforme con la cual sea posible la comunicación de mensajes a través de la utilización de un conjunto básico de identificadores que definan el tipo de mensaje. La uniformidad en la representación empleada para este mecanismo de intercambio de mensajes hace que cliente y servidor utilicen el mismo conjunto de primitivas, con lo cual la descripción en ambos módulos de comunicaciones coincide.

A grandes rasgos podemos diferenciar cuatro tipos de mensajes entre clientes y servidores: mensajes de inicialización, mensajes de configuración, mensajes de estado y mensajes de error. Los primeros representan el flujo de información que tiene lugar en el comienzo de la sesión cuando el cliente intenta conectarse al servidor, requiere los datos del paciente de la base de datos del servidor e informa a la estación central de las señales actualmente disponibles y conectadas al paciente, su tipo, características, etc. Por otra parte, los mensajes de configuración modifican los valores de ciertos parámetros de control, como son las persistencias de las variables, los tiempos de decisión, valores umbrales de los parámetros, etc. Sin embargo, este flujo sólo proviene de la estación central, único puesto de trabajo desde el cual es posible modificar dichos aspectos de la configuración. Los mensajes de estado representan los flujos de información que la estación local remite periódicamente a la estación central con datos de las variables monitorizadas y posibles alarmas disparadas. Por último, los mensajes de error han sido definidos como valor añadido puesto que el protocolo TCP/IP asegura una comunicación fiable. Sin embargo, se ha considerado adecuada su implementación como un medio de verificación los errores que pudieran producirse en la construcción de los mensajes tanto en la estación local como en la central.

6.3.6 Interfaz gráfica

El proceso de diseño y construcción de la interfaz gráfica de usuario es una tarea importante en el contexto de la construcción de un sistema global, y en este caso de un sistema de monitorización inteligente, ya que debe satisfacer las necesidades básicas del

usuario. Por ello es necesario analizar los requerimientos de operación en el entorno para extraer del conjunto aquellos aspectos que diferencian a los usuarios en función del tipo de trabajo que desarrollan.

La interfaz gráfica media entre dos participantes: el operador del sistema interactivo, y el hardware y software que implementa el sistema. Cada uno impone sus propias restricciones sobre el producto final, que será evaluado por el propio operador atendiendo a características de facilidad de manejo, adecuación a la tarea, presentación de resultados, etc. Por todo ello es necesario establecer un modelo de operador, analizar qué tipo de tareas va a realizar con el sistema para definir cual va a ser su grado de interacción y el nivel de detalle de la información que necesita [107][40].

El Capítulo 4 analizaba las tareas del sistema en el dominio y las interacciones que iban a tener lugar con los diferentes tipos de usuarios. A partir de este estudio, se definían dos tipos de operadores: las enfermeras, que a pie de cama del enfermo realizaban tareas de supervisión rutinarias y, por otro lado los clínicos que siguen el caso. Así pues, el nivel de detalle de la información que deben visualizar ambas interfaces tendrá que ser diferente en virtud de que su cometido y nivel de conocimiento es distinto. Además, y a tenor de lo expuesto en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que hace referencia a la distribución de tareas en la monitorización de pacientes, se puede observar que la monitorización rutinaria que lleva a cabo la enfermera a través de un proceso de observación visual de monitores e informes, obtiene como resultado información relativa a las alarmas, tendencias y discrepancias observadas. Es por todo ello, que la implementación de la interfaz tiene que contemplar todos estos aspectos.

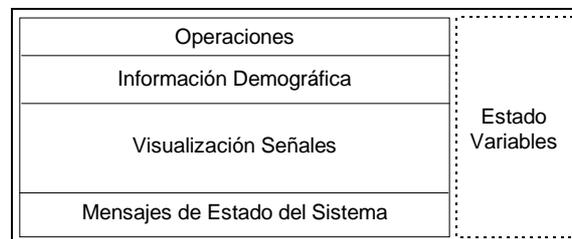


Figura 6-11: Estructura zonal de la interfaz gráfica de la estación local

La Figura 6-11 muestra la división por zonas de la interfaz de la estación local. La zona de operaciones se compone de aquellos controles gráficos que permiten la conexión/desconexión de la máquina al servidor, la configuración de la comunicación

con el monitor biomédico, la modificación de visualización de las señales, información de límites de alarmas, tiempos de reevaluación del paciente, etc. La zona siguiente, denominada zona de información demográfica visualiza el registro electrónico del paciente monitorizado en la estación local, registro que se solicita al servidor cuando la estación local se conecta a la red. A continuación se encuentra la zona de visualización de señales que representa gráficamente en una escala de tiempos las variables fisiológicas disponibles que se están actualmente monitorizando. Por último, la zona de mensajes de estado del sistema visualiza información procedente del servidor sobre el estado de la red, las comunicaciones, el envío/recepción de datos, etc., así como información horaria local. La Figura 6-12 recoge un aspecto concreto de la interfaz de la estación local en ejecución.

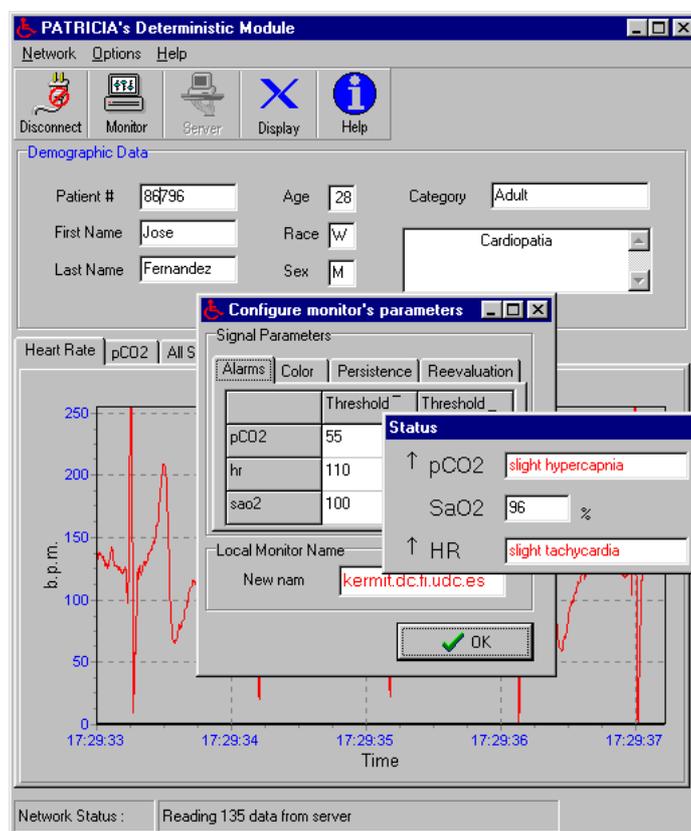


Figura 6-12: Pantalla de la estación local

Si bien no forma parte de la pantalla principal, la ventana de estado de las variables sirve como elemento de visualización rápida de los valores de las señales monitorizadas, junto con información simbólica que cualifica su valor en un rango e información gráfica que indica la tendencia del valor. En el Capítulo 4 se hacía referencia a cómo se realiza la tarea de procesamiento simbólico en el módulo

determinístico, tarea que se implementa en la estación local por medio del módulo de preprocesado simbólico. Dicho módulo *entrega* sus resultados al módulo de control para enviarlos a la estación central y al propio interfaz gráfico. Así pues, los valores simbólicos, que expresan cualitativamente la normalidad o anormalidad del valor del parámetro considerado, son de gran ayuda en la tarea de monitorización rutinaria que se lleva a cabo en las estaciones locales.

6.4 Estación Central

6.4.1 Introducción

La estación central debe considerarse como un elemento de configuración del sistema, de coordinación de componentes y tareas distribuidas, y de integración de datos. Estos tres aspectos y los correspondientes análisis del Capítulo 4, deben guiar el diseño y la implementación de este centro de control, teniendo siempre en mente satisfacer el objetivo de la flexibilidad y la modularidad de la implementación.

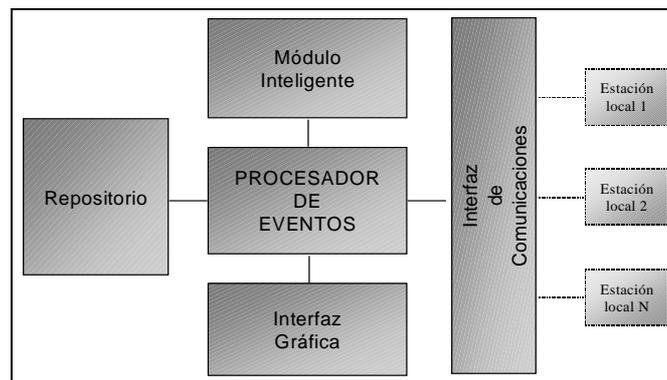


Figura 6-13: Diagrama de bloques de la estación central

La Figura 6-13 muestra el diagrama de bloques de la estación central, en el cual se pueden distinguir cuatro elementos esenciales: el repositorio de datos, el módulo heurístico, la interfaz gráfica y el módulo de comunicaciones. Al igual que en la estación local, el mecanismo fundamental de ejecución de tareas sigue estando gobernado por eventos del mismo tipo a los que se hacía referencia. En este sentido, el procesador de eventos sigue el el diagrama de proceso representado en la Figura 6-10. De esta forma, y por poner un ejemplo, los eventos de comunicaciones pueden provocar accesos a la base de datos o una actualización de la pantalla de visualización de resultados. Por otra parte, los eventos gráficos, provenientes de la interfaz, pueden significar el envío de un

mensaje de configuración a todas las estaciones, o quizás la llamada al sistema experto. La programación orientada a eventos es un mecanismo que facilita la tarea en la implementación ya que es necesario integrar las operaciones de varios clientes. De esta forma, al colocar un handler que maneje el evento, se descarga al servidor de la tarea de controlar continuamente la ocurrencia de sucesos, como podría ser la solicitud simultánea de conexión por parte de varios clientes, o el envío de valores de señal.

De una forma muy general se puede esquematizar cómo es el flujo de información entre los módulos clientes y el módulo servidor (Figura 6-14), que básicamente es de dos tipos: datos e información por un lado, y comandos de control por el otro. La estación central, en su papel de servidor, espera por alguna petición proveniente de los clientes. Las peticiones están relacionadas, bien con la conexión, o bien con el acceso a la base de datos. En la primera situación, una vez concedido el acceso al sistema, la estación central devuelve los parámetros de conexión y de configuración por defecto. En el caso del acceso a la base de datos, la respuesta consiste en el envío de un registro de paciente, el paciente que se encuentra conectado a la estación local. Por otra parte, en el sistema se manifiestan otro tipo de flujos de datos, como ya ha sido definido en el apartado de descripción de la estación local. Estos flujos podrán ser datos numéricos, valores de señales, e información simbólica que debe almacenarse, visualizarse y procesarse en su caso en la estación central. Los mensajes de alarma constituyen un flujo de datos especial, ya que provocan una reacción de doble sentido: reevaluar al paciente y comunicar dicho proceso al cliente para que lo lleve a cabo. Además, existen una serie de comandos de control que la estación central envía a sus clientes conectados cuando, por ejemplo, ocurre una situación de reconfiguración de las variables temporales de monitorización en las estaciones locales.

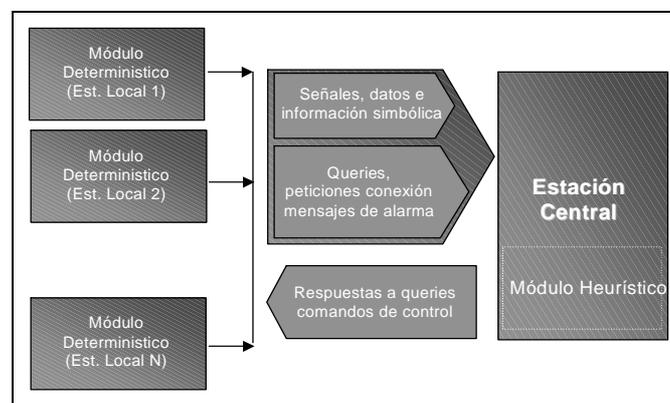


Figura 6-14: Flujo de datos entre estaciones locales y estación central

A pesar de la aparente dificultad de implementación, la estación central modulariza el código agrupándolo en los cuatro subsistemas que a continuación se describen. Para su programación se ha utilizado programación en C y Tcl/Tk [108][109], éste último para el diseño de las interfaces gráficas.

6.4.2 Flujo de datos

La Figura 6-15 muestra los flujos de datos que se manifiestan a nivel general entre los componentes de la estación central. Las entradas y salidas de datos más específicas de los módulos serán comentadas en los apartados correspondientes.

El término repositorio de datos hace referencia a la base de datos del sistema que almacena todos los registros electrónicos de pacientes a lo largo del período de monitorización en la UCI. Por tanto, dicho fichero representa una revisión histórica de la pasada sintomatología del enfermo. A las ventajas inherentes a la naturaleza digital de este tipo de registros (i.e. almacenamiento, procesamiento, recuperación), se añade ahora la posibilidad de que el clínico revise la historia inmediata del enfermo. El módulo de control, a través de la programación de un evento generado por el usuario, puede solicitar la lectura de un registro de paciente determinado, registro que también podría ser enviado a través de la red de datos a cualquier cliente que lo hubiera solicitado.

Un elemento fundamental en la implementación de este módulo es la interfaz gráfica. Si bien la estación local no plantea muchos problemas debido a que está limitada en el conjunto de acciones posibles, la estación central debe incorporar todas aquellos procedimientos dirigidos por eventos que no tienen cabida en el cliente, bien porque comprometen la seguridad del sistema o bien porque escapan de su alcance. Así pues, se le puede considerar como el timón de la nave, puesto que a través de la interacción con él se puede modificar el comportamiento del sistema.

Adicionalmente, y como toda interfaz, sirve como punto de entrada de los datos demográficos, aquellos que por su naturaleza no son susceptibles de cambio a lo largo de toda la estancia del enfermo en la unidad. Mientras el sistema esté on-line la interfaz gráfica es responsable de visualizar correcta y adecuadamente los datos y la información proveniente de los clientes y del módulo heurístico del sistema. En este nivel, la

representación de la información es muy importante ya que el médico debe poseer un amplio espectro del caso clínico a través de una visualización de datos potente.

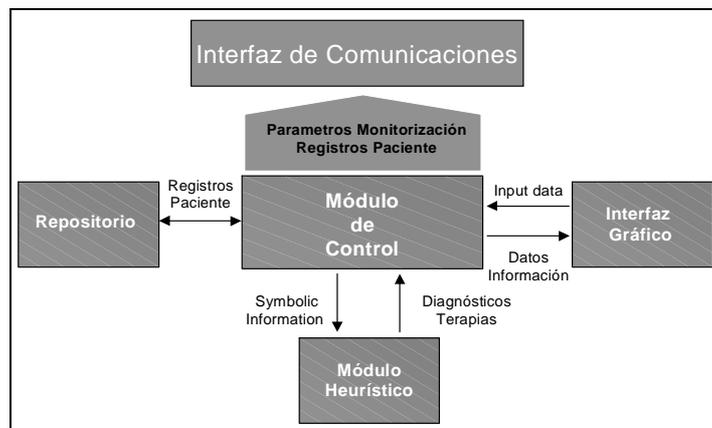


Figura 6-15: Flujo de datos entre subsistemas de la estación central

La parte inteligente del sistema está representada por el módulo heurístico, ampliamente tratado en capítulos anteriores. Su misión consiste en constituirse en asesor y consejero del clínico, que mediante la interacción con el sistema, invoca la ejecución del motor de inferencias para que, dada la situación actual sobre un paciente específico, es decir, la información simbólica de la estación local, evalúe su estado, emita un diagnóstico y sugiera una terapia.

Por último, el módulo de comunicaciones posee la misma estructura que el correspondiente a la estación local, y utiliza el mismo protocolo TCP/IP sobre el cual se construyen los mensajes que se intercambian. En razón de las tareas diferentes que unos y otros tienen asignadas, el tipo de estos mensajes varía entre la estación local y la central. Mientras los primeros envían mensajes de petición o de estado, el segundo utiliza mensajes de autorización o de configuración.

6.4.3 Módulo de Control

El módulo de control de la estación central se encarga de la detección de los eventos generados en el sistema, ya sea a través de la interfaz de comunicaciones o a través de la interacción del usuario. El mecanismo de control es similar al de las estaciones locales representado en la Figura 6-10, con la diferencia de la ausencia de un manejador de eventos temporales, tarea de la cual se encargan las estaciones locales.

Las tareas generales del módulo se limitan a organizar los flujos de información entre los módulos del sistema, como puede ser la inserción de valores de señales en el registro de datos del paciente correspondiente y la visualización en la ventana correcta asociada a la estación local. Sin embargo, existe una tarea especial como es el manejo de la parte inteligente del sistema. Para ello el módulo de control debe recuperar toda la información simbólica del paciente, almacenada en el repositorio de datos, enviar dicha información al sistema experto y activar el motor de inferencias, que obtiene sus conclusiones diagnósticas y terapéuticas. Una vez obtenidas las conclusiones, el motor de inferencias notifica al módulo de control de la disponibilidad de resultados que son recuperados y transferidos a la interfaz gráfica.

6.4.4 Módulo de Comunicaciones

Como ya había sido adelantado al describir el módulo de comunicaciones de la estación local, existen tres tipos de mensajes que pueden comunicar clientes y servidores: inicialización, configuración, y estado. La Tabla 6-1 representa esta división indicando su frecuencia y su cometido concreto.

<i>Tipo de mensaje</i>	<i>Cuando</i>	<i>Para qué</i>
Inicialización	Comienzo o fin de la sesión	Conexión/Desconexión
Configuración	En cualquier momento	Modificación prmtros control
Estado	Periódica/En cualquier momento	Datos, información y alarmas
Error	Después de una comunicación	Reenvío de mensaje

Tabla 6-1: Tipo de mensajes entre estaciones

El flujo de mensajes de inicialización tiene lugar en el momento del establecimiento de la comunicación. El servidor o estación local crea un *socket* y *escucha* un puerto determinado esperando por cualquier flujo de datos de entrada. Un cliente, integrado en la misma red de datos, intenta abrir un *socket* y conectarse al puerto designado de la estación central, que debe ser conocido por el resto de máquinas de la red que deseen acceder a los servicios que presta el servidor. Ligado al puerto del servidor se encuentra un *handler de verificación*, cuyo procedimiento asociado se encarga de identificar al cliente por medio de su dirección IP y autorizar (o denegar) la conexión si se satisfacen las siguientes condiciones: el cliente todavía no está conectado, la máquina se encuentra autorizada para la conexión, no se excede un límite predefinido de clientes, y la estación local tiene un registro de paciente asignado; es decir, la

estación central conoce la ubicación de la máquina y a qué cliente monitoriza. En caso de que la verificación tenga éxito, se autoriza al cliente la conexión y se crea un *handler de lectura del canal* en ambos extremos de la conexión, que se van a encargar de la interpretación del flujo de mensajes. Si la verificación no tiene éxito, el servidor cierra la conexión y se notifica de la situación al cliente.

Una vez creada y autorizada la conexión, tanto cliente como servidor se encuentran en disposición de comenzar el intercambio de mensajes de inicialización. Así pues, el cliente solicita al servidor el envío del registro de datos del paciente que va a monitorizar en la estación local. El tipo de diálogo que se establece es el siguiente:

<i>Estación</i>	<i>Sintaxis del Mensaje</i>
Local (Envía)	GET ¹⁸
Central (Devuelve)	RGET {<campo _i >(<tipo>)=<valor>} i=1,2,...n campos

La estación central, a través del handler de lectura, detecta el flujo de datos, lee el mensaje, lo disecciona y lo interpreta, llamando al procedimiento de recuperación de datos con el número de registro del paciente asociado a esa estación. Dicho asociación debe ser establecida con anterioridad por el personal autorizado a través de la interfaz de la estación central. La query a la base de datos recupera el registro de datos del paciente, y el módulo de control lo redirecciona al procedimiento adecuado de la interfaz de comunicaciones para que componga el mensaje y lo envíe al cliente solicitante. Este proceso, en principio complicado, es sencillo de implementar gracias al uso de eventos, y es similar en cuanto a su ejecución, y a los pasos que es necesario dar, a cualquier otro tipo de solicitud por parte del cliente.

Una vez que el cliente recibe el registro de datos y lo almacena en su base de datos local, notifica al servidor que está dispuesto para iniciar la monitorización, y éste le remite el valor del parámetro de reevaluación del paciente establecido por defecto. El tipo de diálogo que se establece es el siguiente:

¹⁸ Para delimitar el mensaje y particionarlo en campos se estableció el carácter | como separador e indicador de fin de cadena.

<i>Estación</i>	<i>Sintaxis del Mensaje</i>
Local (Envía)	ADT monitor <nombre>
Central (Devuelve)	RADTMON <treevaluacion><valor>

Seguidamente, la estación local comunica qué señales fisiológicas encuentra disponibles para realizar la monitorización, con el fin de que el módulo de control del servidor cree los procedimientos adecuados para llevar a cabo la inserción de datos en los registros de la base de datos y la visualización de señales en la pantalla de la estación central. De este modo, el intercambio de mensajes tendría la forma siguiente:

<i>Estación</i>	<i>Sintaxis del Mensaje</i>
Local (Envía)	ADT signal <señal> {<característica>=<valor>} i=1,2,...,n
Central (Devuelve)	RADTSIG alarm_min=<valor> alarm_max=<valor> persistencia=<valor>

Una vez la estación local identifica y comunica el número de señales que es capaz de adquirir del monitor biomédico conectado, el período de inicialización ha terminado. La estación central se encuentra totalmente configurada para recibir los datos en forma de señales y visualizarlos en la ventana correspondiente, para almacenar los datos de los valores de los parámetros en los registros de datos del paciente, para desencadenar un proceso inferencial a partir de la información simbólica proporcionada, y para alertar al usuario en caso de que ocurra algún tipo de alarma.

A continuación el intercambio de mensajes que tiene lugar se circunscribe a mensajes de tipo configuración o de tipo estado. Los mensajes de configuración tienen lugar cuando a través de la interacción del usuario con la estación central se modifican alguno o todos los parámetros de monitorización que definen la estrategia temporal. Es decir, ocurre cuando el clínico, a través de la interfaz gráfica, otorga nuevos valores a las variables que definen la persistencia de una señal, el tiempo de reevaluación de un paciente o las alarmas sobre un parámetro en particular. El formato del mensaje será el siguiente:

<i>Estación</i>	<i>Sintaxis del Mensaje</i>
Central (Envía)	CFG treevaluacion=<valor> CFG persistencia_<señal>=<valor> CFG alarm_min_<señal> CFG alarm_max_<señal> CFG <contexto>=<presencia o ausencia>
Local (Devuelve)	RCFG

Ante este tipo de mensajes la estación local debe reajustar su estrategia de monitorización, en particular sus *timers* definidos o los límites fijados para los valores de los parámetros.

El tercer tipo de mensajes que se establecen en una comunicación normal son los mensajes de estado. Dichos mensajes informan a la estación central sobre un dato que ha sido recientemente adquirido, una muestra de la señal, una indicación de alarma, etc. El formato que siguen es el siguiente:

<i>Estación</i>	<i>Sintaxis del Mensaje</i>
Local (Envía)	PLOT <señal> <valorX> <valorY> PUT {<señal _i >=<valor>} i=1,2, ..., n señales
(Devuelve)	ALARMON ALARMOFF RPLOT RPUT RALARMON RALARMOFF

Los mensajes PLOT y PUT se diferencian en su finalidad, ya que mientras el primero sirve para enviar muestras de señal para que la zona de visualización de señales de la estación central sea actualizada continuamente, el segundo inserta nuevos datos en la base de datos del paciente, al finalizar el timer que define la persistencia de la variable.

Es necesario resaltar la importancia que han tenido y siguen teniendo la definición de los mensajes de error. El protocolo TCP/IP asegura una comunicación fiable y libre de errores, ocupándose de la retransmisión del paquete de datos si ello fuera necesario. Sin embargo, y con el fin de evitar errores de composición/descomposición del mensaje, se han implementado procedimientos de depuración de errores en ambos puntos de la conexión para facilitar la tarea de implementación de ambos sistemas, local y central. Así, si el mensaje recibido por alguna de las dos partes es defectuoso, se emite un mensaje de error a la otra parte con el fin de que vuelva a componer el mensaje y los reenvíe a su destino otra vez.

La interrupción de los servicios que proporciona el servidor se realiza de dos formas: o bien es el cliente el que realiza la desconexión de la red a través de un mensaje CLOSE, o es el servidor quien desconecta al cliente cerrando el socket. En el

primer caso, es el operador de la estación local quien, a través de la interfaz gráfica, activa el proceso de desconexión. En el segundo caso, es el médico que interactúa con la estación central quien tiene la facultad de desconectar una estación local. El cierre del socket, como si de un fichero se tratase, provoca un flujo de datos en ambos lados de la conexión y la activación de los handlers asociados al fin de la conexión.

6.4.5 Módulo inteligente

La implementación del módulo heurístico del sistema, descrito en los capítulos 4 y 5, utiliza llamadas a rutinas de librería proporcionadas por el software de construcción de sistemas expertos Nexpert Object®. Dichas librerías poseen funciones definidas para implementar la agenda y los mecanismos de inferencia referenciados en el capítulo 5. De este modo, la codificación de este módulo inteligente integra funciones para la carga de bases de conocimiento, sugerencia de hipótesis, propagación de valores y reinicialización del estado del motor de inferencias después de la ejecución. Para desencadenar el proceso inferencial, el módulo de control de la estación central envía al sistema experto la información simbólica disponible en el momento actual, ejecuta el motor de inferencias, y recibe las conclusiones del sistema, diagnósticos y terapias, que deben ser enviados a la interfaz gráfica para su presentación en pantalla. Hay que significar que este sistema experto no reside en la estación central por necesidades de implementación, pero que perfectamente puede coexistir con el resto de módulos de la estación central. La razón estriba en la disponibilidad de una versión del software Nexpert Object actualizada para el sistema operativo de la máquina que soporta la estación central, Solaris 2.5. Pese a la aparente dificultad que significa la ejecución de un proceso en otra máquina mucho más lenta a través del uso de RPC¹⁹, y de la complejidad y el volumen de información que maneja la base de conocimientos, el módulo inteligente compila el conocimiento y obtiene conclusiones en un tiempo muy corto.

¹⁹ Remote Procedure Call, interfaz de programación que permite llamar para su ejecución a procedimientos remotos de forma transparente para el usuario

6.4.6 Interfaz Gráfico

Una de las tareas más importantes que recaen sobre la estación central es la tarea de control y configuración de la red y del sistema. Desde el puesto de trabajo del servidor deben facilitarse las tareas de gestión del sistema en lo concerniente a las comunicaciones y la monitorización. Según Mora [40] la comunicación hombre-máquina debe posibilitar la transmisión de datos entre estaciones remotas y centrales, el ajuste de dispositivos remotos desde la estación central, la flexibilidad de configuración y comunicación. y la facilidad de expansión del sistema con nuevas estaciones. Así pues, la interfaz debe suministrar mecanismos gráficos adecuados para trabajar con este tipo de supuestos.

Un aspecto importante que hay que destacar es el tipo de usuario al que va destinado este puesto de trabajo, algo que condiciona el tipo de interfaz gráfica. Tomando en consideración el Capítulo 4 de análisis, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de distribución de tareas y el concepto de diagnóstico médico tal y como ha sido expuesto en el Capítulo 2, la interfaz de la estación central ha sido diseñada siguiendo la estructura de la Figura 6-16.

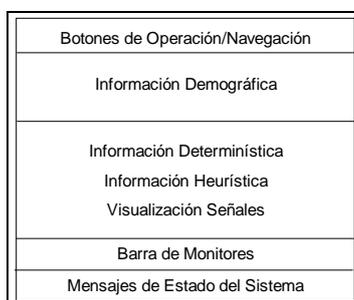


Figura 6-16: Estructura zonal de la interfaz gráfica de la estación central

La zona de botones de operación y navegación definen cuatro subáreas dedicadas a la configuración e interacción del usuario, como se ve en la Figura 6-17.

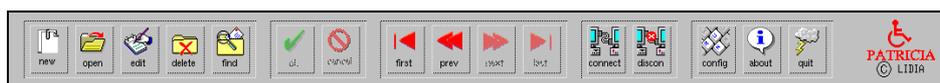


Figura 6-17: Barra de botones de operación y navegación

En la primera subárea, el operador de la estación central puede efectuar las operaciones clásicas de altas, bajas y modificaciones de registros de paciente, así como funciones de edición y búsqueda a través de la pulsación de estos accesos directos. Una

segunda subárea se dedica a la navegación secuencial por la base de datos, con botones para el acceso al siguiente/anterior registros y primero/último. La tercera área permite la conexión y desconexión de equipos. Para la tarea de conexión, el operador debe elegir un registro de paciente de la base de datos o crear uno nuevo y asignarle un monitor de la lista que aparece en la Figura 6-18. Una vez hecho esto, el servidor se encontrará en disposición de recibir la conexión del cliente con ese nombre y permitirle el acceso. El botón de desconexión hace la tarea contraria y elimina una conexión abierta entre una estación local y la estación central.

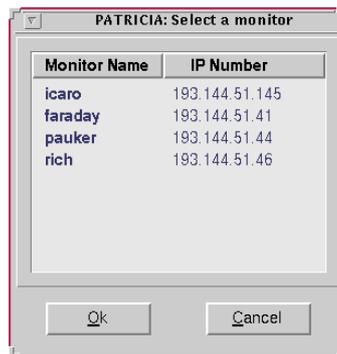


Figura 6-18: Ventana de asignación de monitores

La última subárea facilita la configuración de diversos aspectos y características de la estación central. La funcionalidad de este botón es muy importante, ya que permite que el clínico pueda adaptar el proceso de monitorización sobre un paciente específico desde la consola central. Así, permite cambiar tiempos de reevaluación de los pacientes y parámetros de persistencia de las señales actualmente disponibles para una estación local específica (i.e. paciente). La Figura 6-19 visualiza la ventana mencionada.

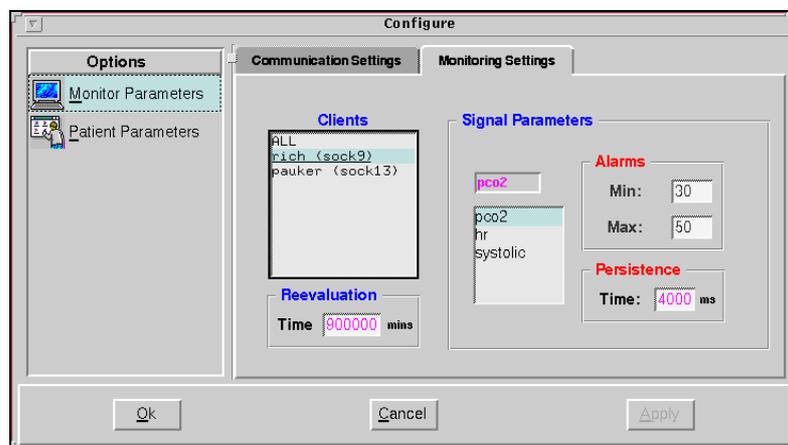


Figura 6-19: Ventana de modificación de settings temporales de monitorización

El mismo botón permite la definición de límites y alarmas sobre los parámetros de las variables fisiológicas del paciente. Es decir, es posible adecuar el funcionamiento del módulo determinístico de las estaciones locales en cuanto a la tarea de procesamiento simbólico y definición de las alarmas. La Figura 6-20 muestra el aspecto de la ventana.

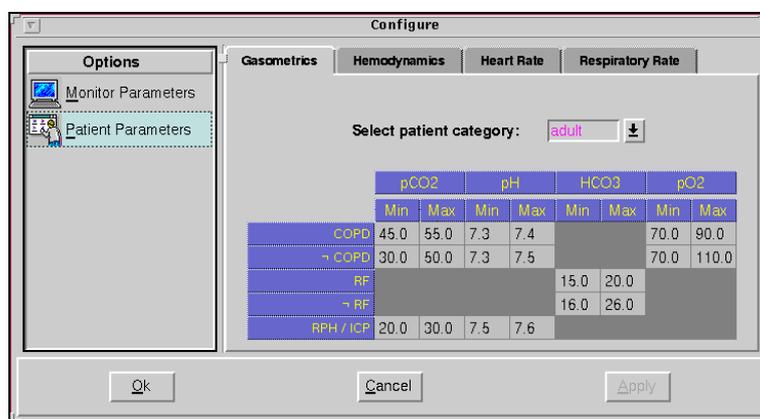


Figura 6-20: Ventana de modificación de rangos numéricos de interpretación de variables

Un último aspecto que destacar de este botón es que permite editar la lista de equipos, de entre todos los de la red de información, a los que se les permite acceder a los servicios. Además puede cambiar el puerto de conexión de la estación central y modificar el número máximo de conexiones de los clientes.

A tenor de lo visto, la configuración del sistema es una característica muy deseable y exigible a la hora de implementar una interfaz gráfica ya que confiere flexibilidad al sistema global.

Siguiendo la estructura zonal de la pantalla, la zona siguiente es área destinada a la visualización de la información demográfica del paciente, es decir, aquella que no es susceptible de cambios frecuentes. Entre esta información se encuentra el nombre y apellidos del enfermo, la dirección y características como la raza, sexo y fecha de admisión. Es importante hacer explícita la categoría a la cual pertenece el paciente, puesto que este aspecto puede condicionar la aplicabilidad de un conjunto de rangos de numéricos de interpretación de variables u otros, ya que consideran la edad del paciente para su determinación.

En la pantalla de la estación central aparece a continuación una zona compartida por tres tipos de información. En primer lugar, la información proveniente del módulo

determinístico de la estación local correspondiente, que visualiza los datos numéricos actuales de las parámetros del paciente junto con su interpretación simbólica, traducida en un diagrama de barras. En segundo lugar, se representa información obtenida a través de la ejecución del motor de inferencias del sistema experto, como aparece en la Figura 6-21. En ella aparecen los mismos datos que en la pantalla del módulo determinístico a excepción de la información simbólica, sustituida ahora por las conclusiones diagnósticas y terapéuticas. Por último, existe una ventana a la cual se dirigen los datos de las señales que obtiene la estación local a partir del monitor biomédico conectado.

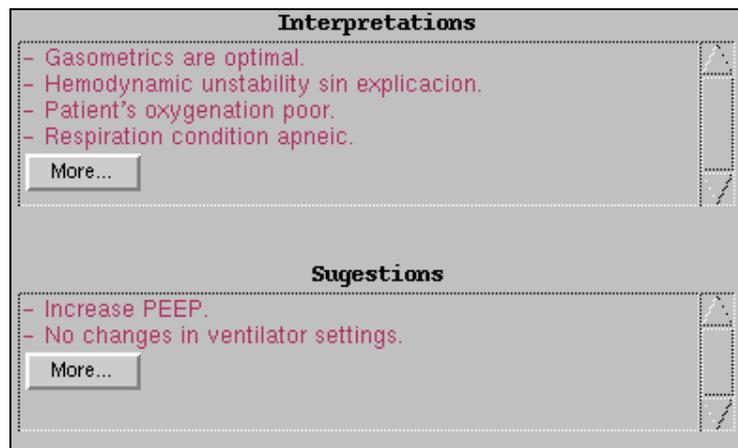


Figura 6-21: Fragmento de la ventana del módulo heurístico

La barra de monitores es una estructura que contiene tantos botones como monitores estén conectados a la estación central. De esta forma, la pulsación de un botón de la barra permite acceder directamente y de una forma rápida a toda la información relativa al complejo paciente-instrumentación, es decir, demografía del paciente, datos numéricos actuales, información simbólica y visualización de señales pertinentes.

Por último, la zona de mensajes de estado del sistema incluye una etiqueta relativa al área sobre la cual está interaccionado el usuario con el ratón, fecha y hora actuales y monitor al cual está conectado el paciente cuyo registro se está actualmente visualizando. En la Figura 6-22 aparece la pantalla de la estación central al completo, en la cual aparecen dos monitores conectados al servidor.

En nuestra opinión la interfaz desarrollada es completa en cuanto a la información que presenta al usuario, a la vez que simple en sus formas y contenidos buscando la claridad y la compresión en la interacción. El lenguaje de programación gráfica Tcl/Tk

ha contribuido a lograr un look-and-feel estándar, integrando controles gráficos semejantes a los de la interfaz de cualquier producto comercial, buscando la aceptación del usuario.

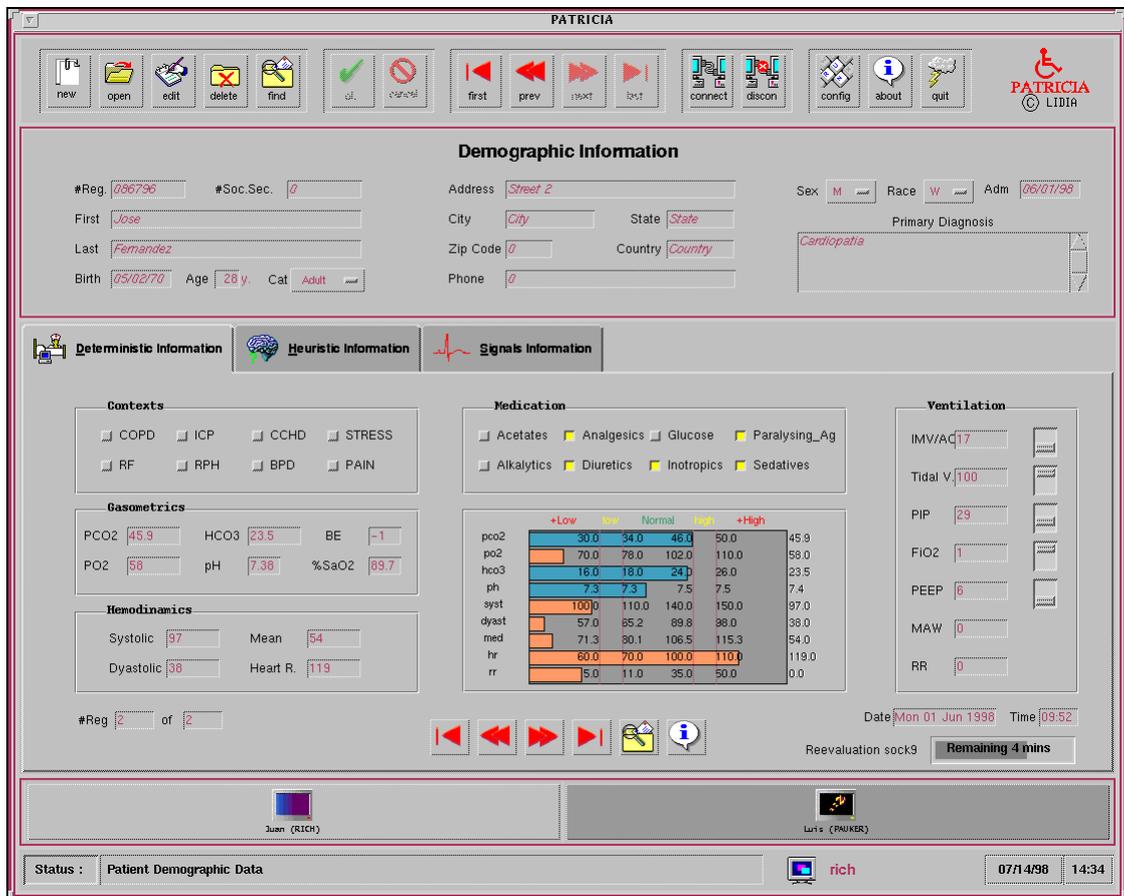


Figura 6-22: Ventana principal de la estación central

6.5 Resumen

La arquitectura cliente-servidor plantea un modelo computacional de operación entre máquinas en el cual unas prestan servicio a las otras. Aplicando este esqueleto formal al dominio del problema y a la modularización propuesta, el módulo determinístico se integra en la parte cliente, dedicado a tareas de adquisición y procesado simbólico, y el módulo heurístico en la máquina servidor, dedicado a tareas de gestión y control del sistema. La red de datos permite la interconexión física de los equipos y la comunicación a través del protocolo TCP/IP y el uso de sockets.

La estación local es punto del sistema más cercano al paciente ya que controla directamente al monitor fisiológico y puede actuar sobre los dispositivos de asistencia. Por tanto, sus tareas se reparten entre la recogida y envío de datos al servidor y la

visualización de información. Su objetivo es la monitorización rutinaria del enfermo, tarea que realiza la enfermera.

Por otra parte, la estación central actúa como centro de control y gestión del sistema global. Sus tareas se reparten entre el control de acceso de los clientes, la recepción de datos e información de las estaciones locales, los accesos a la base de datos y la ejecución del sistema experto. Además posibilita la configuración remota de los clientes conectados, a través de la modificación de la estrategia temporal de monitorización propia.

El sistema está adaptado a las características de cada puesto de trabajo, de forma que las estaciones locales completarían el trabajo de supervisión rutinaria de la enfermera, mientras que la estación central asistiría en las tareas médicas que requieren mayor cualificación y responsabilidad, donde el volumen de datos y nivel de información es muy superior.

7. RESULTADOS

*Once the toothpaste is out of the tube, it's hard to
get it back in.
(Harold Robbins Haldeman)*

7.1 Validaciones previas de las bases de conocimiento de PATRICIA

La validación del sistema ha sido llevada a cabo en distintas etapas a lo largo de su ciclo de desarrollo. Como prototipo de investigación, PATRICIA fue validado globalmente. Para ello se analizaron un total de 350 conjuntos de datos simulados que representaban la mayoría de combinaciones de distintas situaciones clínicas que se hallaban implementadas en la base de conocimientos del sistema. El clínico que colaboró en el diseño analizó los mismos datos y sugirió las modificaciones oportunas a la base de conocimientos. Posteriormente se efectuó una validación retrospectiva en el Medical College de Georgia de Augusta, Georgia, sobre 119 casos reales de pacientes de unidades de cuidados intensivos. El análisis fue realizado independientemente por: (1) el médico asistente que trató cada caso en particular a pie de cama, (2) el experto que colaboró en el diseño del prototipo de investigación (off-line), y (3) el propio sistema experto. Los resultados se muestran en la Tabla 7-1, que compara el rendimiento del sistema frente al del experto humano y al del clínico asistente, así como ambos clínicos frente a frente [44].

<i>Clínico vs Experto Colaborador</i>	79%
<i>Clínico vs Sistema Experto</i>	78%
<i>Sistema Experto vs Experto Colaborador</i>	92%

Tabla 7-1: Porcentajes de acuerdo totales en todas las categorías

En un segundo paso, tras un refinamiento del conocimiento, y para evitar el sesgo que podría haber producido el propio entorno de desarrollo, se diseñó una nueva validación del prototipo de investigación utilizando 147 casos reales procedentes de la

UCI del Hospital Juan Canalejo de A Coruña. En este caso, se analizaron los porcentajes de acuerdo por categoría diagnóstica entre el equipo médico y el sistema. Los resultados aparecen en la Tabla 7-2.

<i>Oxigenación</i>	92%
<i>Balance Ácido-Base</i>	74%
<i>Hemodinámica</i>	87%
<i>Terapia Ventilatoria</i>	71%

Tabla 7-2: Porcentajes de acuerdo por categoría diagnóstica

Tras el análisis de calidad del prototipo de investigación, los buenos resultados indicaron la posibilidad de transitar el prototipo de investigación a prototipo de campo. [44]

7.2 Metodología de Validación del Prototipo de Campo

La transición del sistema experto PATRICIA a prototipo de campo sugirió la necesidad de efectuar un análisis exhaustivo del sistema, que arrojara alguna luz para comprobar si realmente el sistema había alcanzado la categoría deseada.

La elección de un método de validación lleva consigo la aplicación de una metodología definida que, en función de las características del sistema, del dominio y de los datos disponibles determine qué método es más adecuado. En concreto, la metodología propuesta para la validación de PATRICIA contempla tres pasos fundamentales [110][111]: fase de planificación, fase de aplicación de métodos y fase de interpretación de resultados.

La fase de planificación analiza las características del dominio del problema y del sistema inteligente. En este caso, dado que en el dominio de cuidados críticos no es posible comparar los resultados del sistema con salidas reales, y tampoco se puede correr el riesgo de tomar una decisión equivocada, no es posible llevar a cabo una validación contra el problema. Además es difícil establecer una referencia estándar, por lo que el *análisis clúster* [112] aparece como una herramienta adecuada.

Una característica importante es que las salidas del sistema toman la forma de diagnósticos categorizados a los que se les asocia la etiqueta lingüística correspondiente,

por lo que la validación puede usar medidas cuantitativas, como los *porcentajes de acuerdo* [113] y las *medidas kappa y kappa ponderada* [114]. Para ello es necesario construir una tabla de contingencia con la cual llevar a cabo medidas de pares entre los distintos expertos y el sistema. Además, será necesario definir una estrategia de ponderación de las discrepancias observadas entre categorías semánticas de los diagnósticos sugeridos por los expertos.

Por otra parte, el sistema inteligente se puede dividir en cinco módulos diagnósticos, que pueden ser analizados independientemente y validarse frente casos históricos o actuales, y dos módulos terapéuticos que sólo pueden validarse de forma retrospectiva. Todos ellos generan resultados de un conjunto semántico organizado y, por tanto, será necesario tener en cuenta la distancia existente entre dichas categorías para evaluar las posibles discrepancias.

Una vez determinadas qué medidas se van a emplear, la fase de aplicación determina la captura de la casuística de los datos, el preprocesado y el cálculo de medidas de pares, medidas de acuerdo y ratios de acuerdo.

Para que el análisis del rendimiento del sistema sea preciso es muy importante tener una adecuada casuística clínica que sea representativa del conjunto de problemas que trata el sistema. En concreto, se encontraban disponibles 30 casos reales de las situaciones más comunes, que representan más de 210 datos indicativos de distintas categorías diagnósticas y terapéuticas (i.e. oxigenación, hemodinámica, respiración endógena, balance ácido-base, frecuencia cardíaca, terapia ventilatoria y terapia oxigenatoria), provenientes todos ellos del Medical College de Georgia. Los casos analizados fueron presentados de forma ciega e independiente a todos los expertos y al sistema experto. La cualificación de los expertos se muestra en la Tabla 7-3.

Para la captura de los datos se usó un documento de elicitación-validación en el cual se incluyeron datos demográficos, datos fisiológicos, contextos inferenciales e interpretaciones clínicas y decisiones terapéuticas sobre la gestión ventilatoria y clínica del paciente. En total fueron recogidos 1470 casos de los 6 expertos mencionados y el sistema experto, que fueron identificados con las letras A,B,C,D,E,F, y G.

Como último paso de esta fase de aplicación, se aplicaron los test de pares, en concreto utilizando los *porcentajes de acuerdo* y las medidas *kappa* y *kappa ponderada*, y el test de grupo, que requirió un *análisis cluster*.

<i>Experto 1</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 3 años de residencia en pediatría. • 2 años de postdoctorado en UCI pediátrica. • 2 años de dirección en UCI. • Certificado de excelencia en cuidados intensivos pediátricos.
<i>Experto 2</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 3 años de residencia en pediatría. • 2 años de postdoctorado en UCI pediátrica. • 8 años de experiencia profesional en UCI. • Certificado de excelencia en cuidados intensivos.
<i>Experto 3</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 3 años de residencia en cuidados intensivos. • 3 años de postdoctorado en UCI pediátrica. • 6 años de experiencia profesional en UCI. • Certificado de excelencia en cuidados intensivos pediátricos.
<i>Experto 4</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 3 años de residencia en pediatría. • 2.5 años de postdoctorado en cuidados intensivos.
<i>Experto 5</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 3 años de residencia en pediatría. • 0.5 años de postdoctorado en cuidados intensivos.
<i>Experto 6</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 3 años de residencia en pediatría.

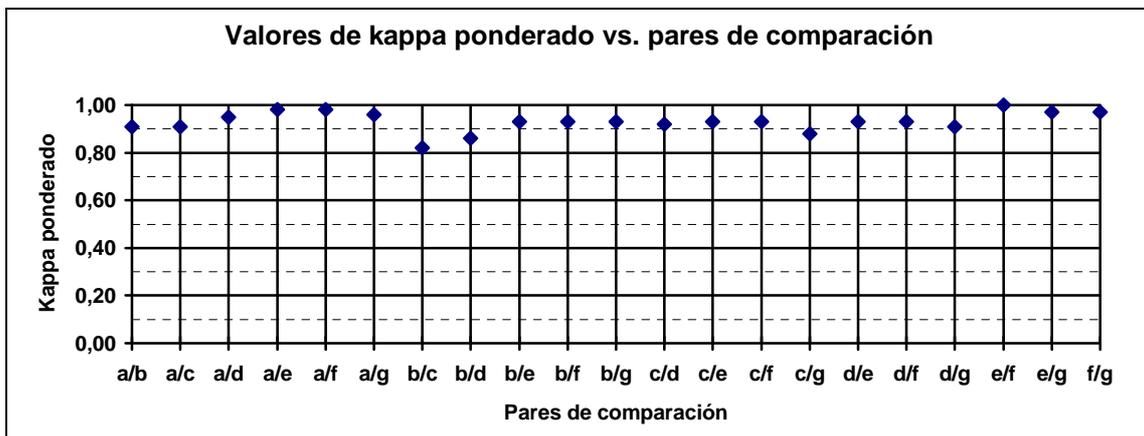
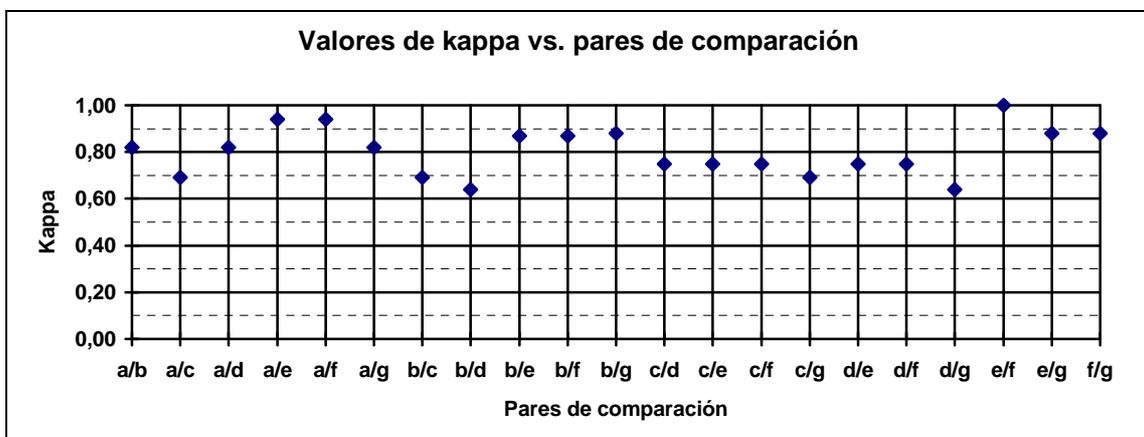
Tabla 7-3: Categoría profesional y experiencia de los expertos

A continuación se presentan los resultados comentados para cada categoría diagnóstica y terapéutica, así como el test de grupo para comprobar cuáles son los posibles grupos de expertos y comprobar a cual pertenece el sistema experto.

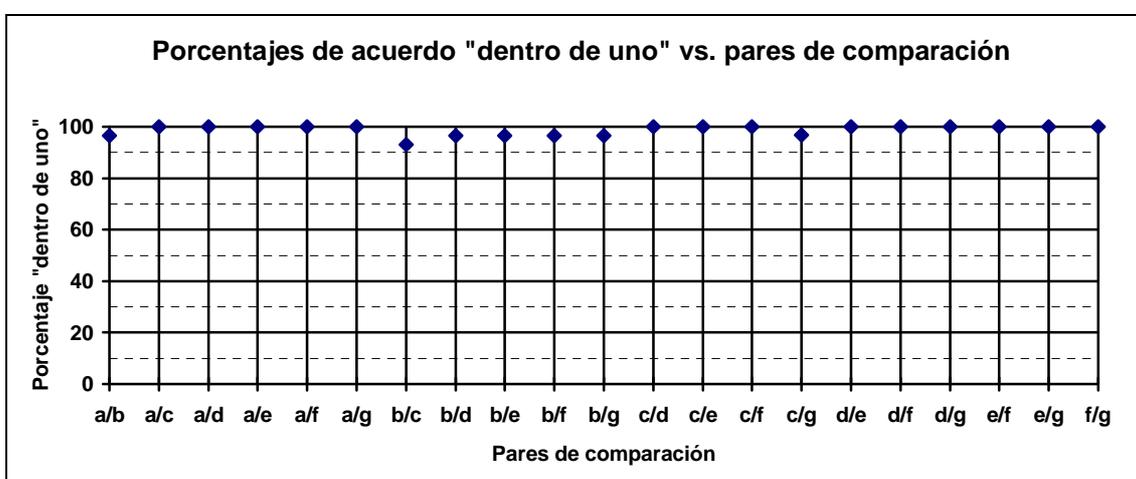
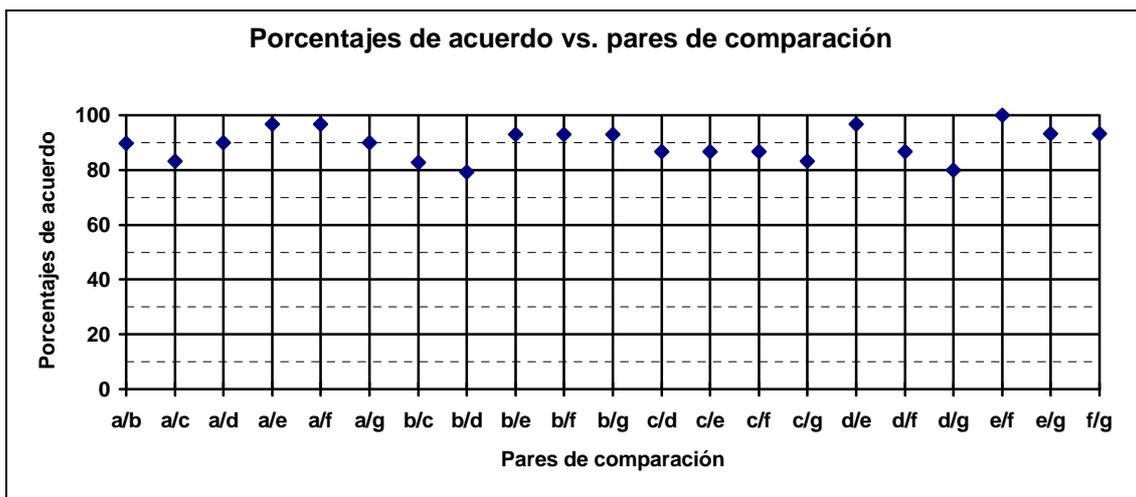
7.3 Resultados para la categoría diagnóstica de Respiración Endógena²⁰

Experto 1\Experto2	Taquipnea Severa	Taquipnea Moderada	Aceptable	Bradipnea Moderada	Bradipnea Severa
Taquipnea Severa	0	1	4	9	16
Taquipnea Moderada	1	0	1	4	9
Aceptable	4	1	0	1	4
Bradipnea Moderada	9	4	1	0	1
Bradipnea Ligera	16	9	4	1	0

Tabla 7-4; Pesos de las etiquetas simbólicas en Kappa ponderada

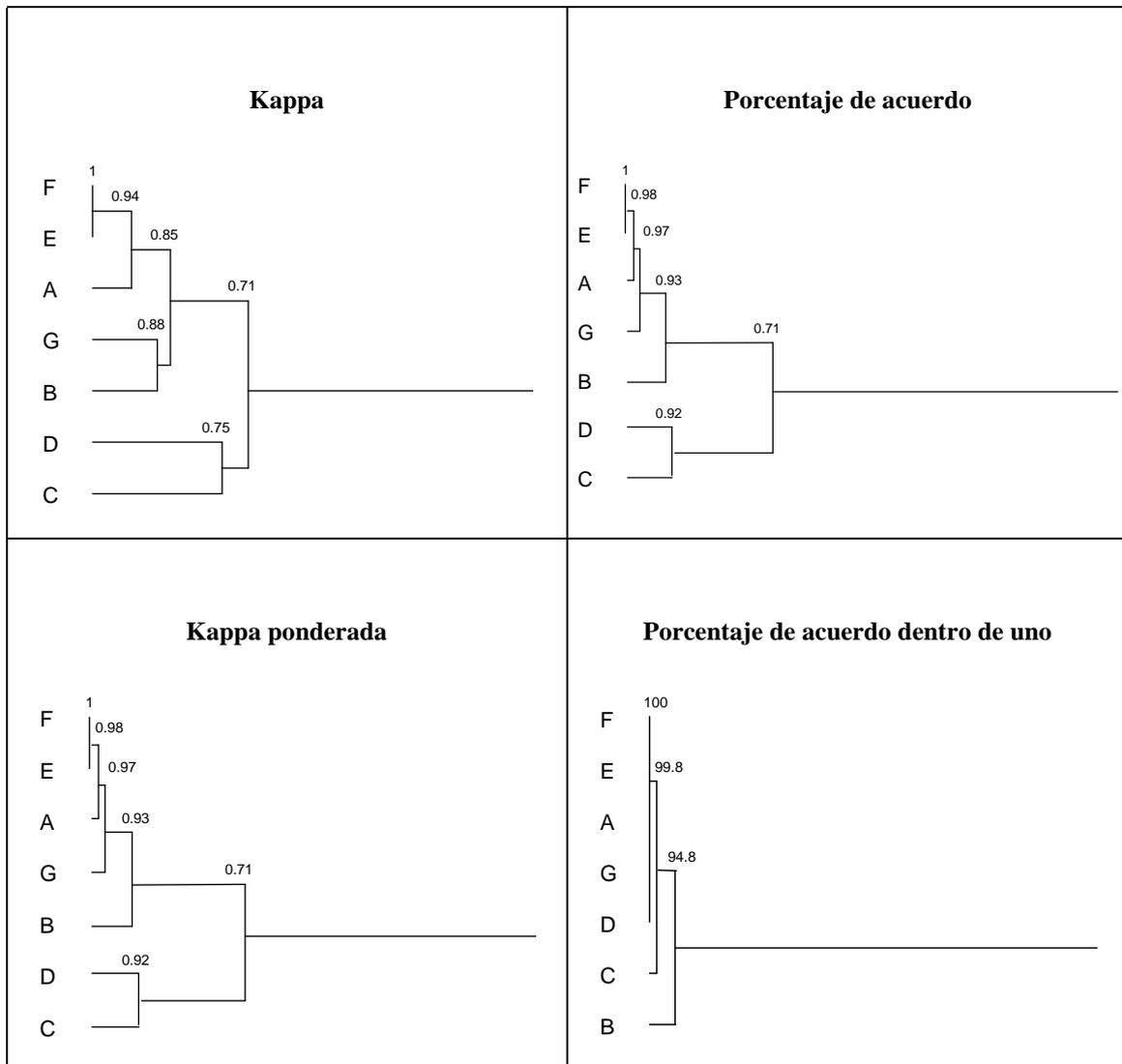


²⁰ En la representación gráfica adjunta, la secuencia de pares en la escala de abcisas no guarda ninguna relación temporal



A la vista de estas gráficas se puede concluir que los resultados obtenidos tanto por los expertos humanos como por el sistema experto son muy buenos. El *porcentaje de acuerdo* no baja del 80% y el *porcentaje de acuerdo dentro de uno* obtiene prácticamente un acuerdo total. Los resultados de *kappa* se hayan por encima del 0.6, mientras que *kappa ponderada* sube por encima del 0.8. Esto indica que las discrepancias observadas son más una cuestión de matiz que un error interpretativo.

Análisis Cluster

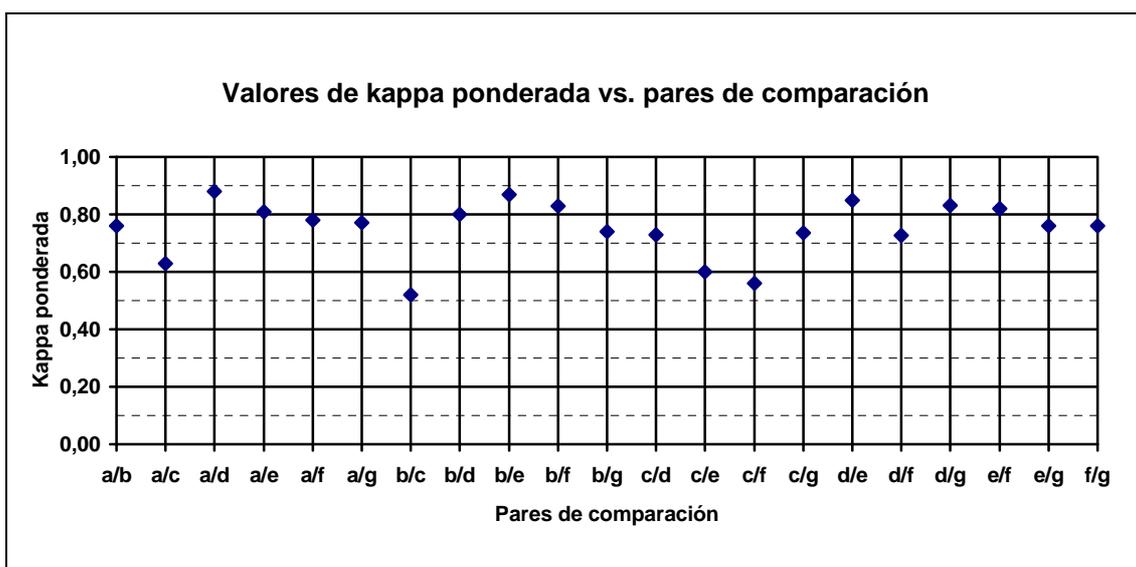
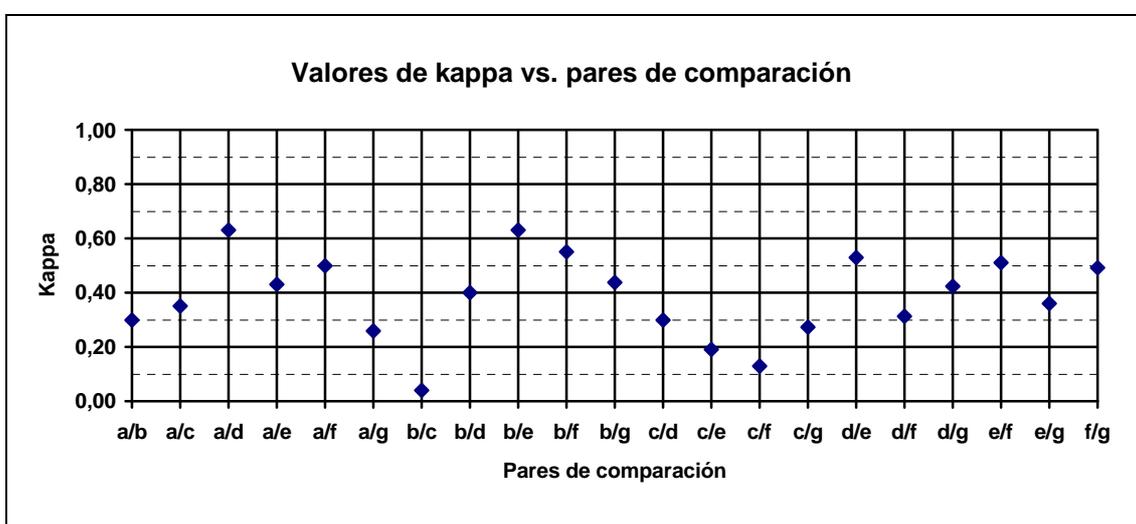


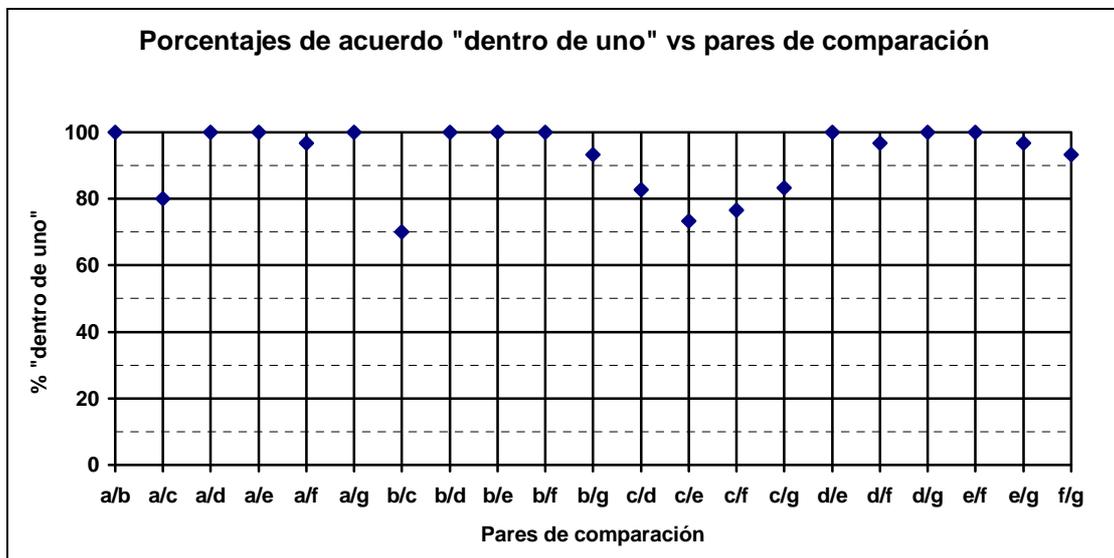
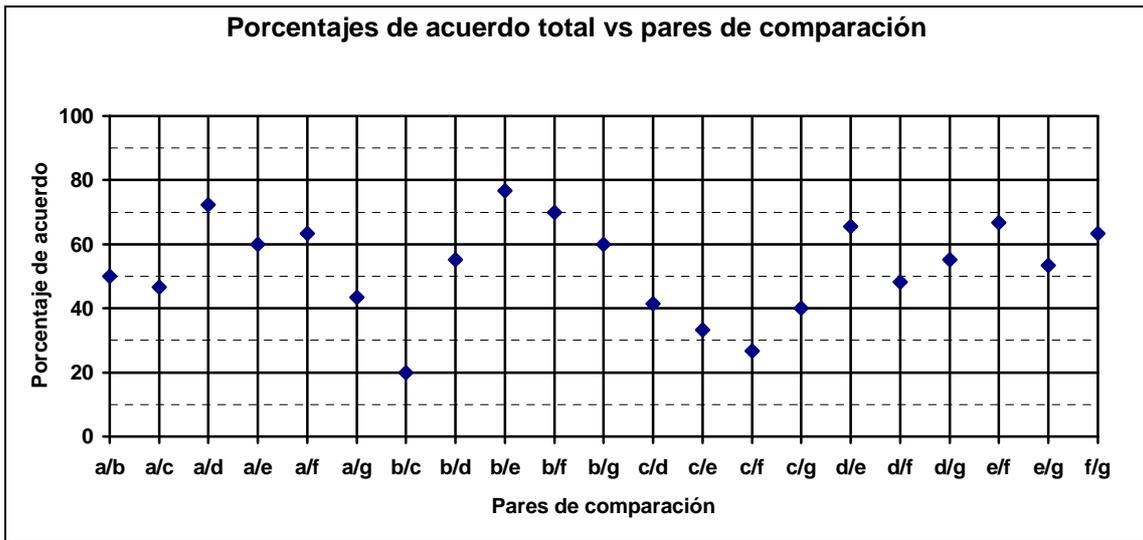
En cuanto al *análisis cluster* se puede observar que *el acuerdo dentro de uno* virtualmente nos agrupa a todos los expertos dentro de un mismo cluster lo cual nos da muy poca información. El índice *kappa* y *el porcentaje de acuerdo* determinan tres clusters: un primer cluster que agrupa a los expertos F, E y A; un segundo cluster que agrupa a B y a PATRICIA y un tercer cluster que agrupa a D y C. Esto confirma los valores mínimos de acuerdo que generalmente ocurren entre los pares a/c, b/c, b/d, c/g, d/g. Sin embargo cuando realizamos el análisis de kappa ponderada vemos que el sistema experto se une al grupo formado por F, E y A, mientras que B queda más distanciado.

7.4 Resultados para la categoría diagnóstica de Hemodinámica

Experto 1\Experto2	Hipertensión Severa	Hipertensión Moderada	Normotensión	Hipotensión Moderada	Hipotensión Severa
Hipertensión Severa	0	1	4	9	16
Hipertensión Moderada	1	0	1	4	9
Normotensión	4	1	0	1	4
Hipotensión Moderada	9	4	1	0	1
Hipotensión Severa	16	9	4	1	0

Tabla 7-5: Pesos de las etiquetas simbólicas en Kappa ponderada



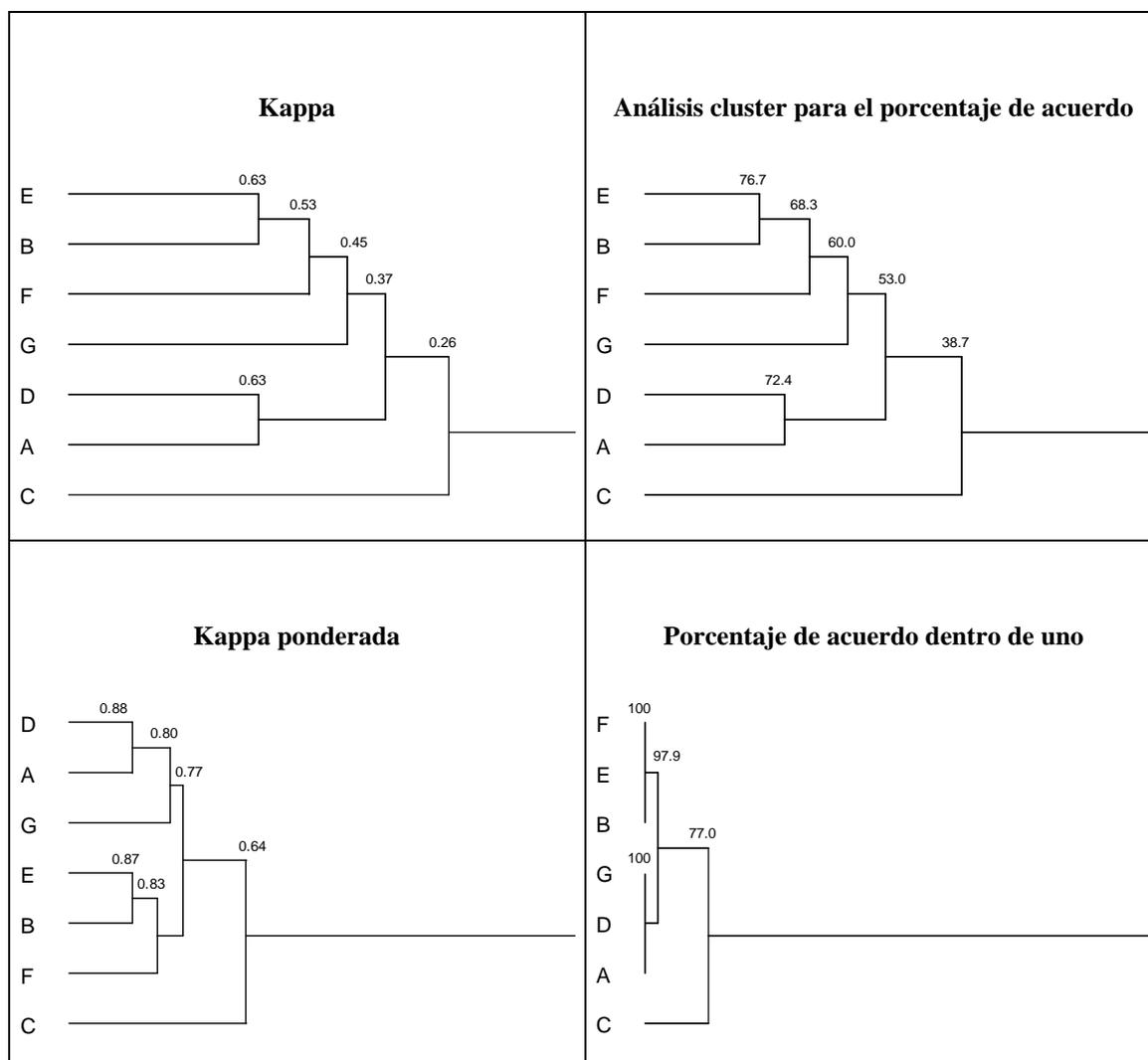


En base a los datos de las medidas *kappa* y *kappa ponderada* los porcentajes se puede ver que hay un experto (C) claramente distanciado del resto de expertos. En todas las gráficas los valores mínimos son aquellos acuerdos que se dan entre el C y cualquier otro de los expertos, que se encuentran más o menos al mismo nivel. Así en la *kappa ponderada* los resultados eliminando al experto C se encuentran siempre por encima del 0.75.

Los resultados de la *kappa* y del *porcentaje de acuerdo* pueden considerarse muy bajos debido a que consideran todos los desacuerdos de la misma manera. Al tener cinco categorías semánticas que no tienen un significado claro y exclusivo en el dominio correspondiente son corrientes las confusiones entre categorías adyacentes. Al realizar la ponderación en el índice *kappa ponderada* estos pequeños desacuerdos quedan

minimizados y el resultado es que los valores de concordancia mejoran.

Análisis Cluster

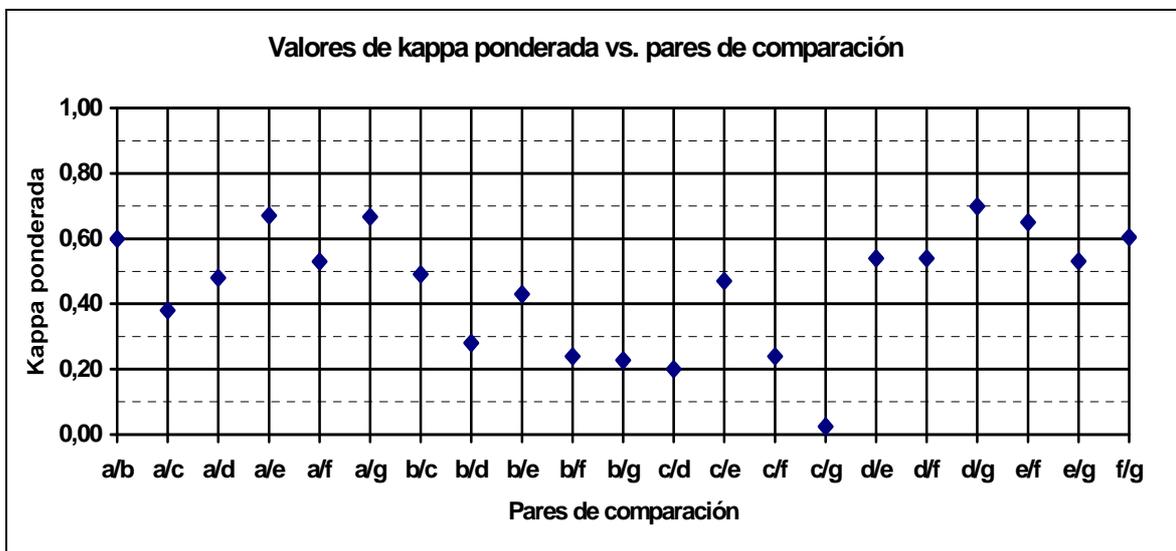
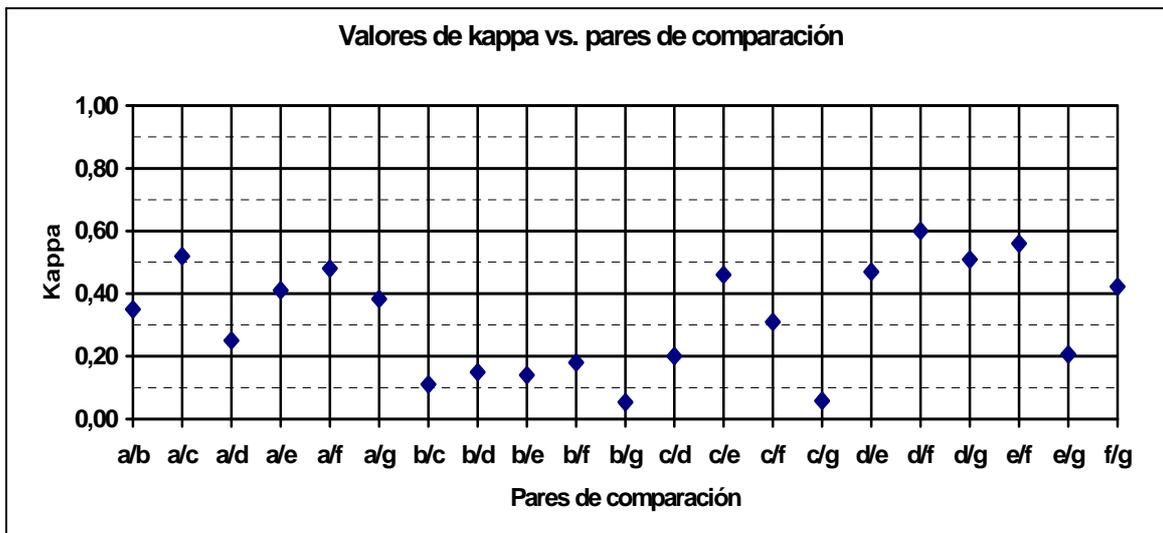


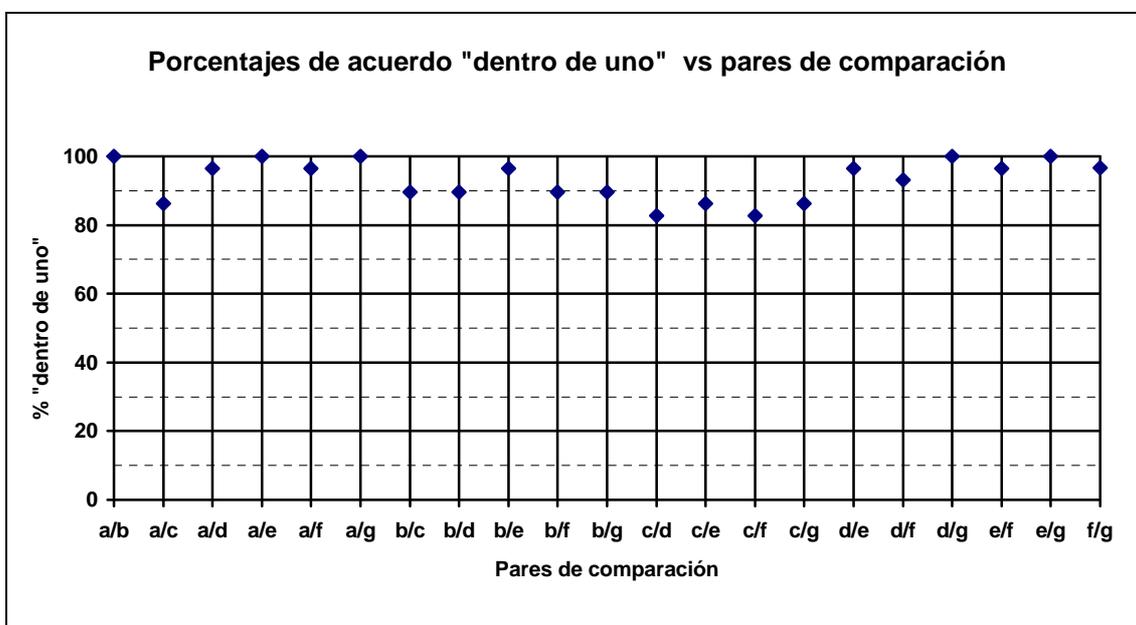
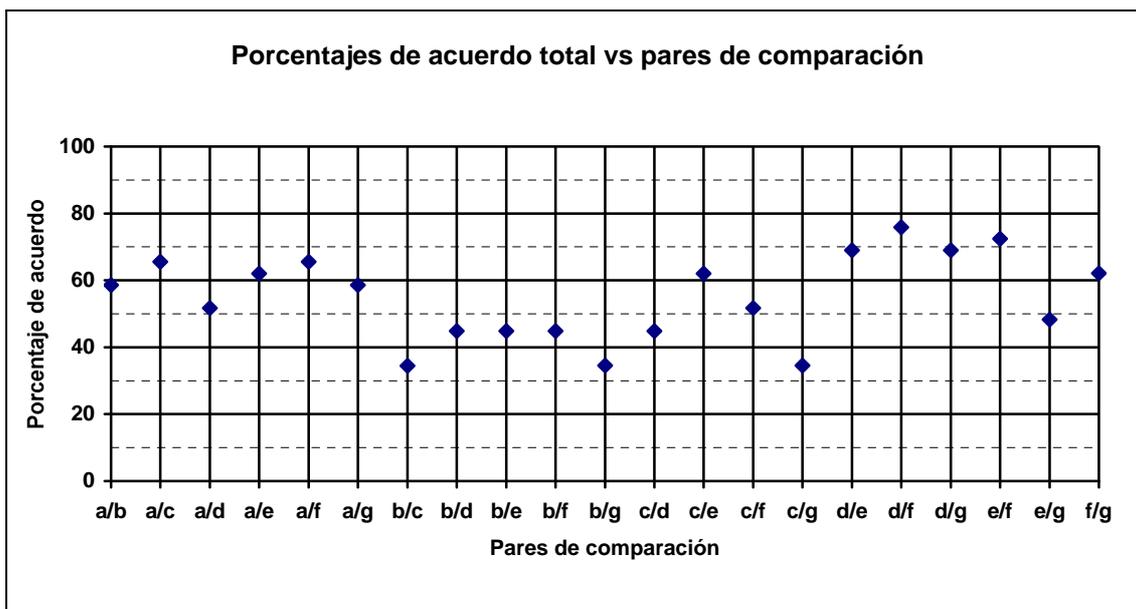
El análisis cluster muestra en todos sus índices un cluster formado por los expertos E, B y F; otro cluster formado por los expertos A y D; y el sistema experto a caballo entre estos dos últimos clusters. Así en *kappa* y *porcentaje de acuerdo* se une a EBF, y en *kappa ponderada* y *acuerdo dentro de uno* se une a D-A. Esto indica que los diagnósticos del sistema experto difieren de los de A y D en una sola categoría semántica por lo que el valor de *kappa ponderada* aumenta mucho con respecto al *kappa*, y el *porcentaje de acuerdo dentro de uno* alcanza el 100%. A pesar de estas diferencias, los resultados obtenidos por todos ellos son aceptables, excluyendo al experto C, que no obtiene resultados aceptables prácticamente con ninguno del resto.

7.5 Resultados para la categoría diagnóstica de Frecuencia Cardíaca

Experto 1\Experto2	Taquicardia Severa	Taquicardia Moderada	Normocardia	Bradicardia Moderada	Bradicardia Severa
Taquicardia Severa	0	1	4	9	16
Taquicardia Moderada	1	0	1	4	9
Normocardia	4	1	0	1	4
Bradicardia Moderada	9	4	1	0	1
Bradicardia Severa	16	9	4	1	0

Tabla 7-6: Pesos de las etiquetas simbólicas en Kappa ponderada

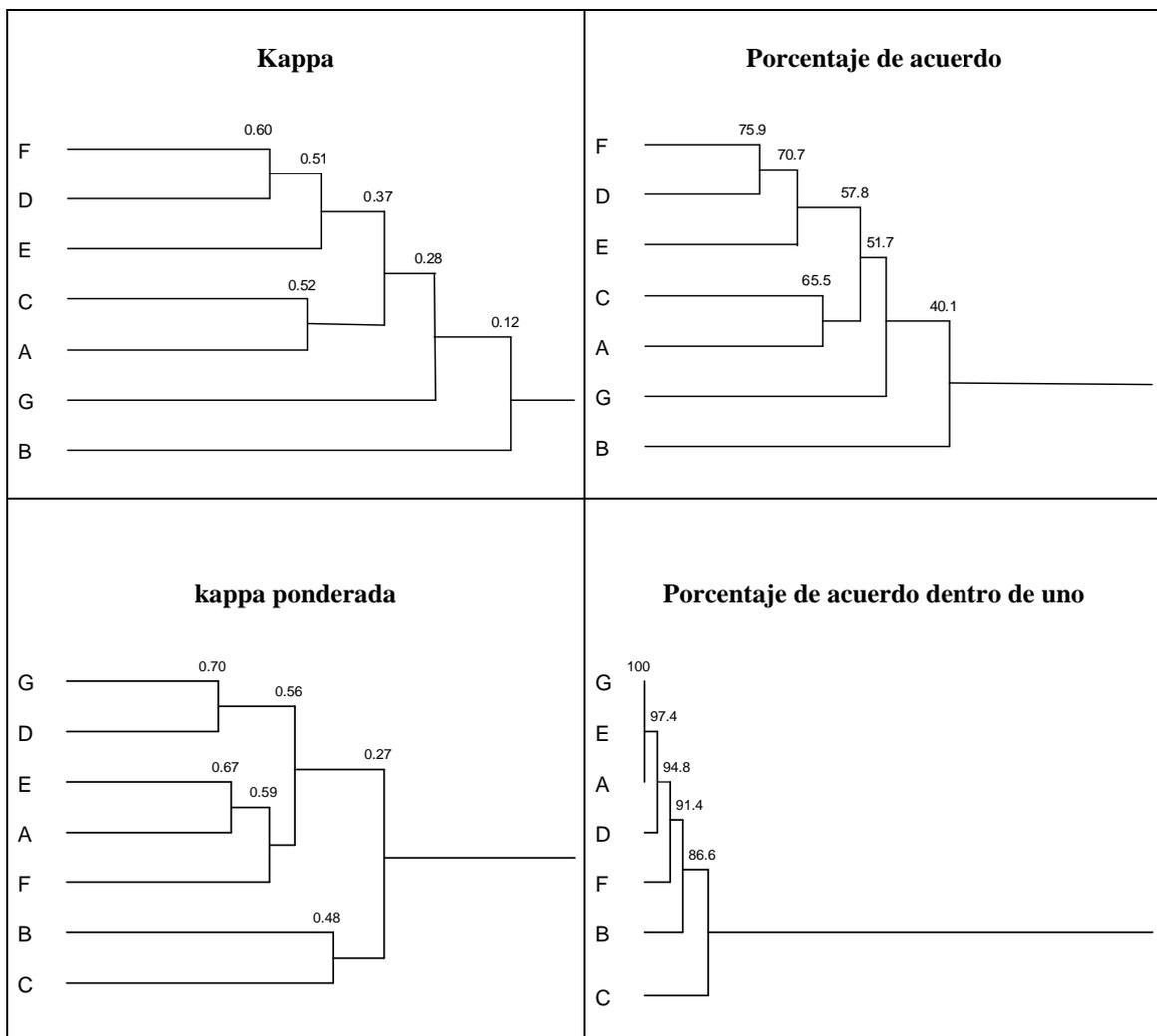




Los resultados obtenidos de las medidas *kappa* y de los *porcentajes de acuerdo* indican que hay dos expertos (B y C) que difieren claramente del resto. Sin embargo, A, D, E, F y G presentan un nivel similar. Como se sabe, el índice *kappa ponderada* no penaliza todas las discrepancias de la misma forma, de modo que si se éstas se diferencian en pocas categorías semánticas el valor ponderado debería ser superior al de *kappa* y al *porcentaje de acuerdo*. En este caso las diferencias entre el grupo A, D, E, F, y G son cuestiones de matiz ya que el *acuerdo dentro de uno* presenta valores muy cercanos a la unidad. Sin embargo al realizar el análisis de *kappa ponderada*, los resultados, aunque mejores que los de *kappa*, son peores que los obtenidos en el *porcentaje de acuerdo*. Para explicar este hecho hay que hacer referencia a los datos y a

las tablas de cálculo de los índices: el sistema experto no ha diagnosticado nunca bradicardia severa ni bradicardia moderada, el experto F nunca ha diagnosticado bradicardia severa y sólo en un 7% de los casos bradicardia moderada. De esta forma la distribución de los datos está poco balanceada entre las distintas clases, lo cual provoca que el valor del acuerdo debido a la casualidad sea elevado y que, por lo tanto, el valor de *kappa* y *kappa ponderada* sea pequeño (o por lo menos no tan grande como cabía esperar a partir del *porcentaje de acuerdo*).

Análisis cluster



El análisis cluster muestra que en el índice *kappa* y en el *porcentaje de acuerdo* tenemos un cluster formado por los expertos F, D, E, C y A al que luego se le unen el sistema experto y el experto B. Es de destacar la buena posición que ocupa el experto C,

cuando antes parecía que era uno de los que presentaba peores acuerdos. La razón estriba en que al utilizar una técnica de clustering jerárquica y al presentar C un acuerdo elevado con A, C se une en un cluster con A y no vuelve a ser reasignado a pesar de que su acuerdo con el resto de los expertos es muy bajo. Este es uno de los problemas principales de las técnicas de cluster jerárquico, problema que no podría detectarse si no es comprobando las tablas adjuntas.

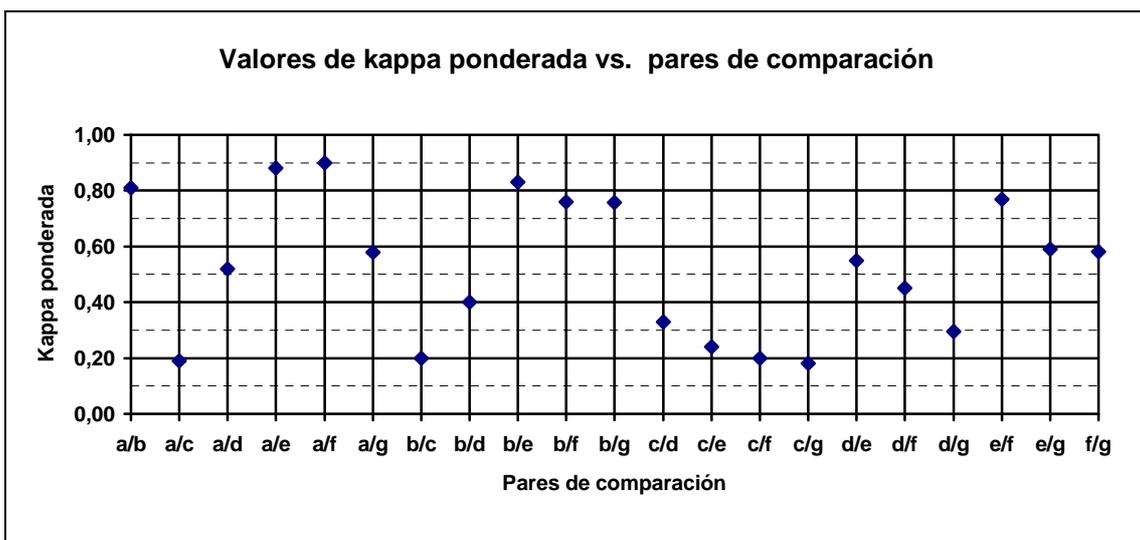
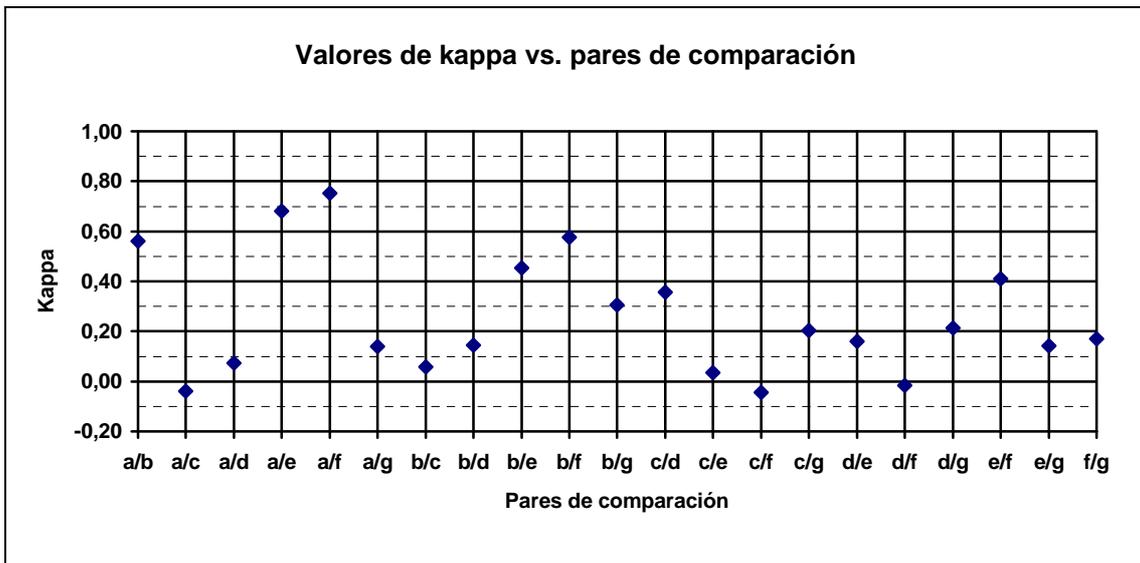
También hay que resaltar el hecho de que el sistema experto no ocupe una buena posición al realizar el clustering con las medidas *kappa* y con los *porcentajes de acuerdo*, pero sin embargo esta situación mejora ostensiblemente al realizar el clustering con la *kappa ponderada* y con el *porcentaje de acuerdo dentro de uno*. Esto indica que las discrepancias del sistema experto con el resto de expertos son la mayoría de las veces entre categorías adyacentes, como se ha visto en otros casos precedentes. Además, otro motivo de esta situación se deriva del problema anterior y es que al unirse A con C, y teniendo el sistema experto un acuerdo muy bajo con C, provoca que se adhiera a ese cluster a un nivel muy bajo.

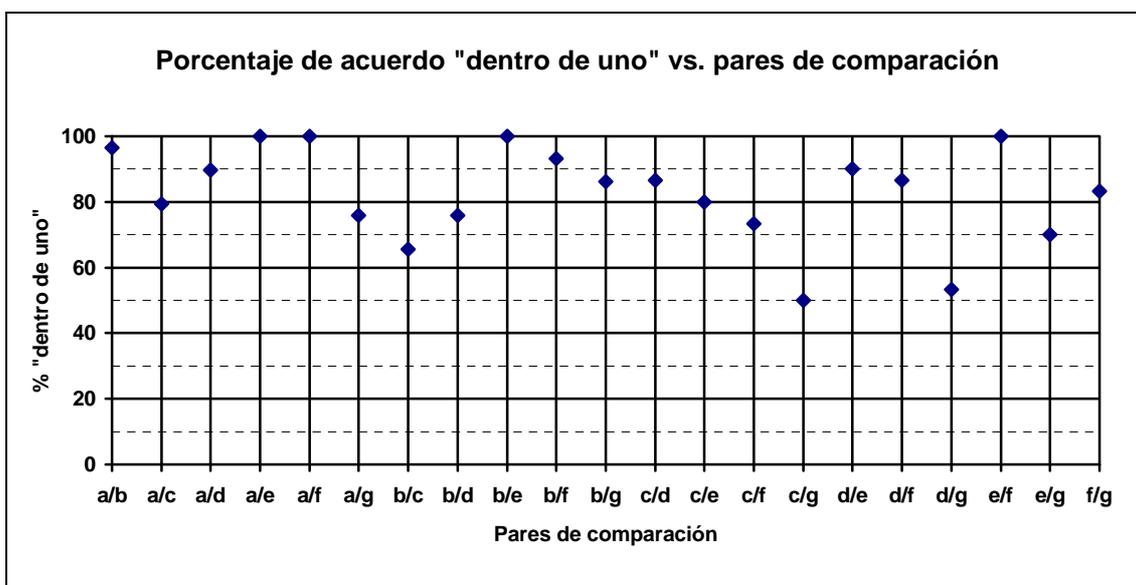
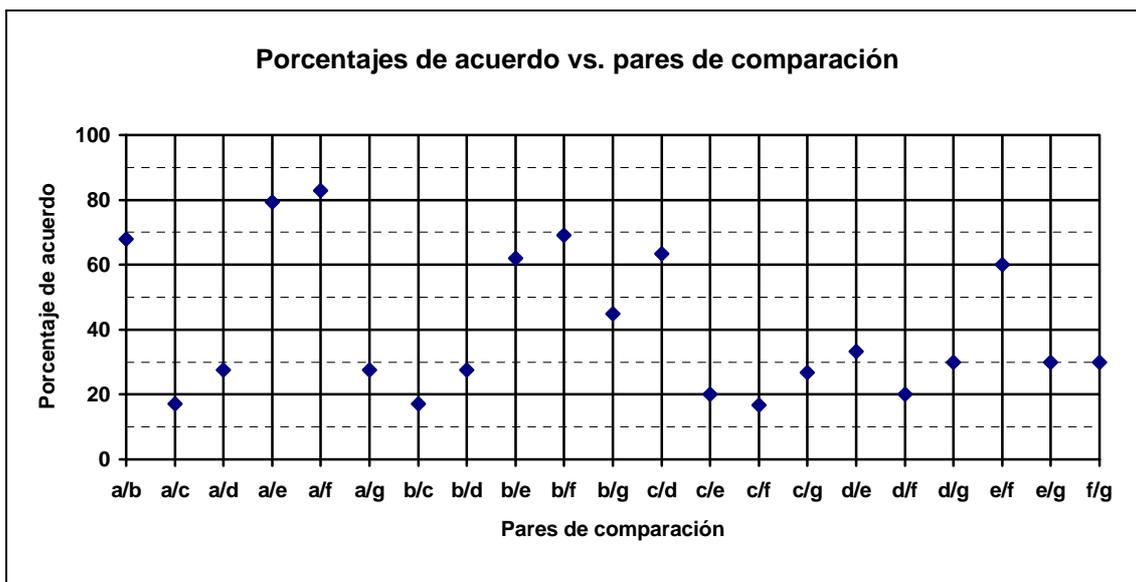
Por último, se puede observar cómo al realizar la ponderación el experto C baja hasta la última posición, de este modo confirmando que sus discrepancias con el resto de expertos son mucho más graves de las que presenta el sistema experto.

7.6 Resultados para la categoría diagnóstica de Oxigenación

Experto 1\Experto2	Hiperoxemia Severa	Hiperoxemia Moderada	Normoxemia	Hipoxemia Moderada	Hipoxemia Severa
Hiperoxemia Severa	0	1	4	9	16
Hiperoxemia Moderada	1	0	1	4	9
Normoxemia	4	1	0	1	4
Hipoxemia Moderada	9	4	1	0	1
Hipoxemia Severa	16	9	4	1	0

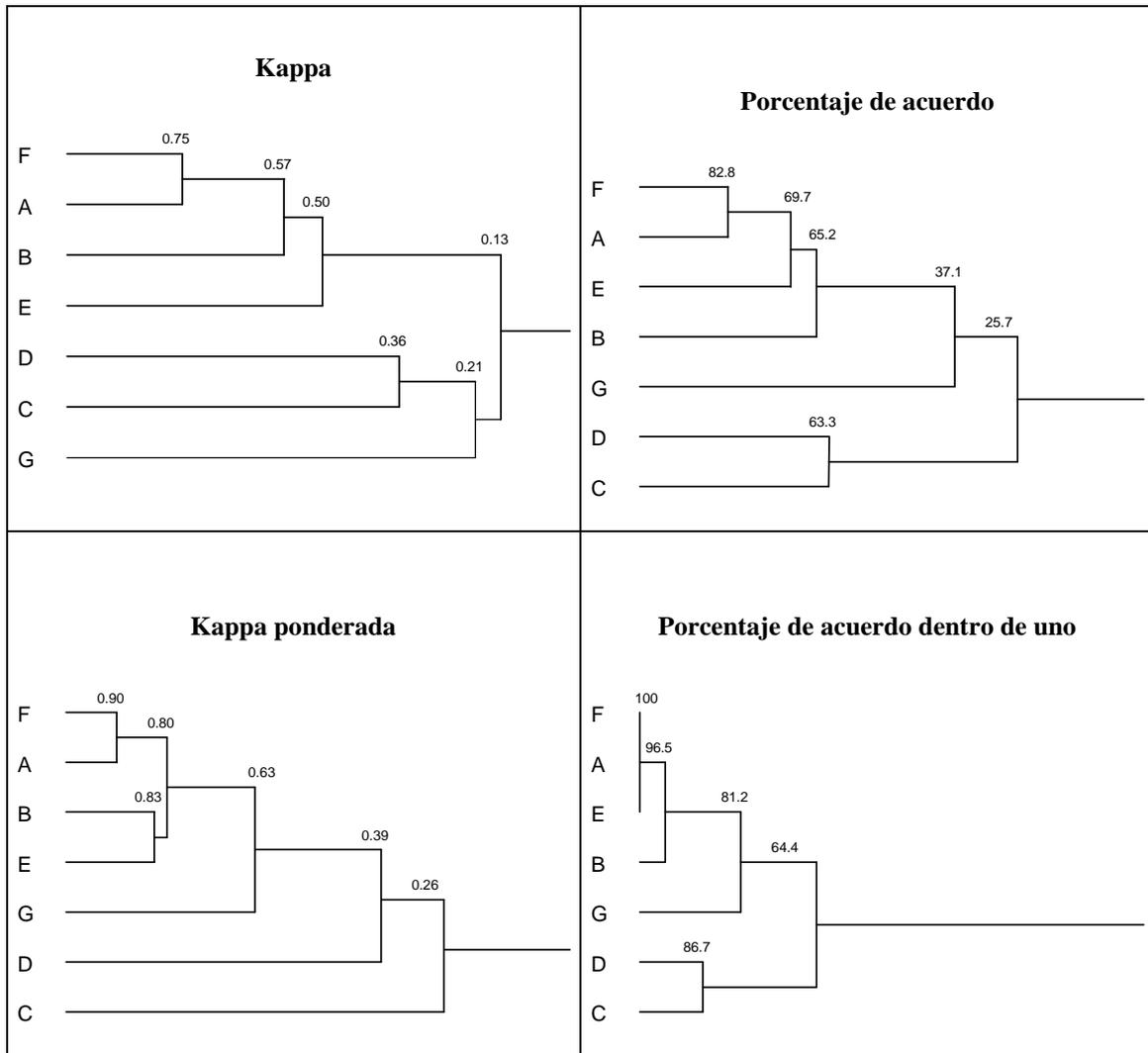
Tabla 7-7: Pesos de las etiquetas simbólicas en Kappa ponderada





En esta categoría existen valores de concordancia muy bajos, en especial con los expertos C y D, e incluso aparecen valores negativos en el índice *kappa* que indican que los acuerdos son menores que los debidos a la casualidad. La razón más lógica que explica la situación analizando las tablas de cálculo de las medidas de concordancia es que estos expertos no tengan la categoría suficiente para diagnosticar correctamente la oxigenación o que cometieran errores a la hora de realizar sus diagnósticos. Por otra parte los resultados del sistema experto tampoco fueron demasiado buenos, aunque mejores que los obtenidos por C y D.

Análisis Cluster



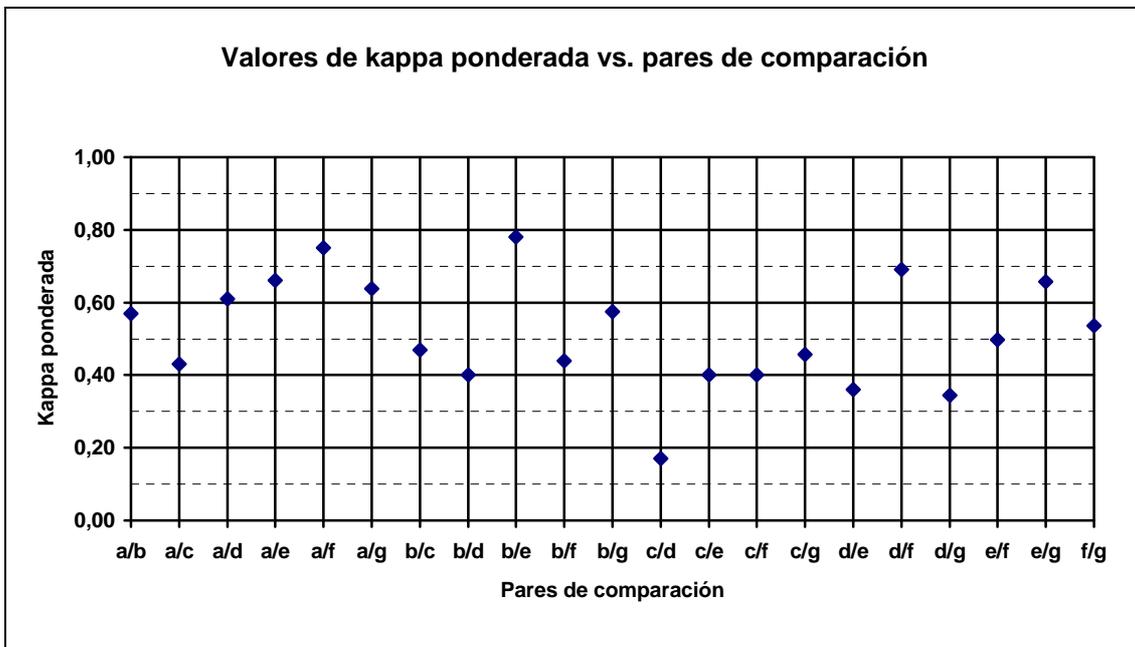
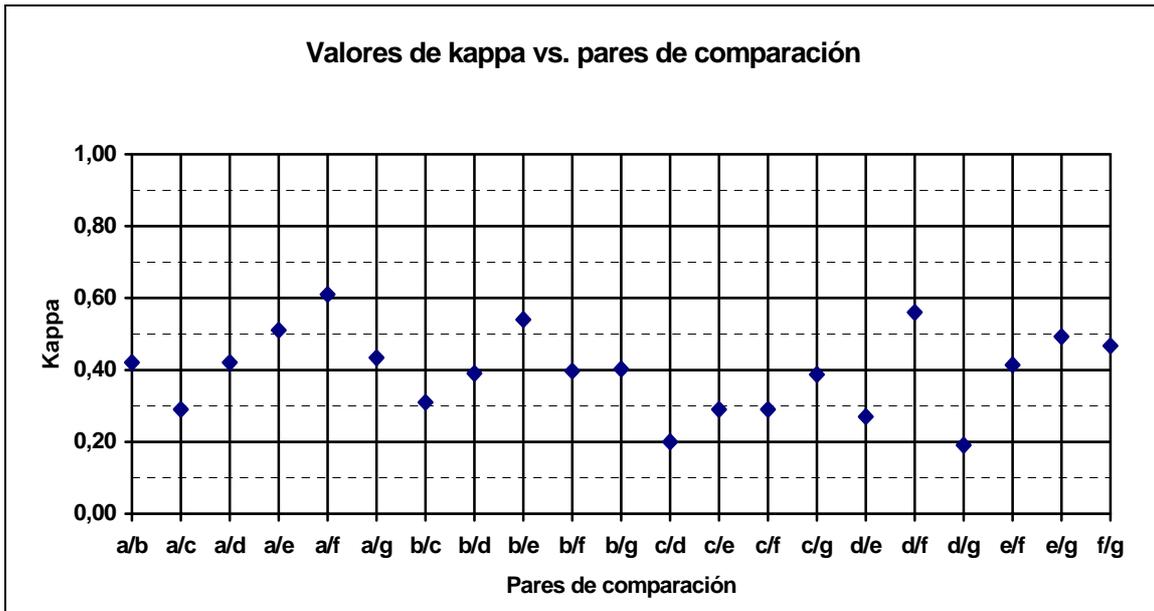
El *análisis cluster* confirma las hipótesis. Los expertos A y F presentan el mayor acuerdo, seguidos a cierta distancia por los expertos E y B. A éstos se une el sistema experto a bastante distancia y, por último, los expertos C y D que forman un grupo muy distante del resto de expertos.

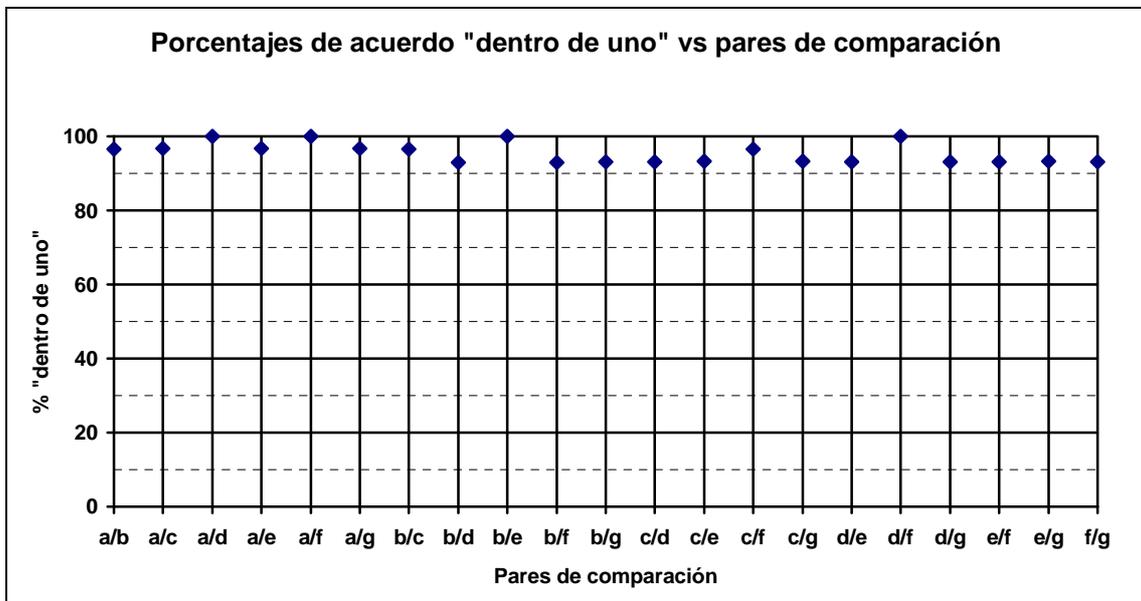
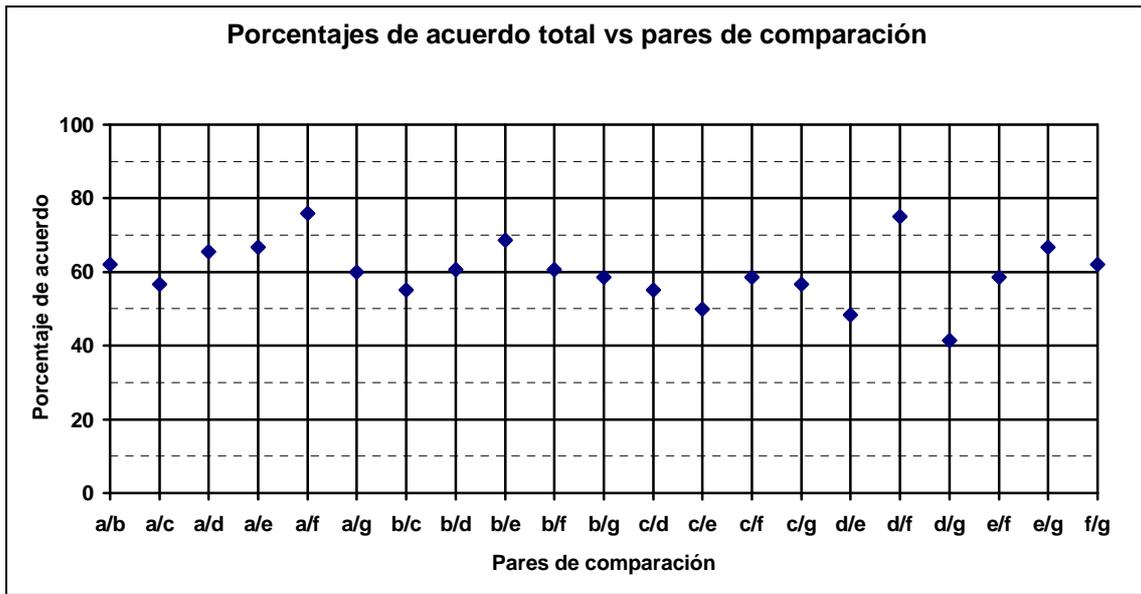
Puesto que los resultados del sistema experto respecto a la oxigenación no eran los deseados, se decidió observar los resultados de la terapia oxigenatoria, ya que era posible que no existiera un acuerdo a la hora de diagnosticar la situación oxigenatoria del paciente, pero que el sistema experto coincidiera con los expertos a la hora de elaborar una terapia adecuada a dicho paciente.

7.7 Resultados para la categoría diagnóstica de Oxigenación

Experto 1\Experto2	Incrementar	Mantener	Decrementar	Eliminar
Incrementar	0	1	4	9
Mantener	1	0	1	4
Decrementar	4	1	0	1
Eliminar	9	4	1	0

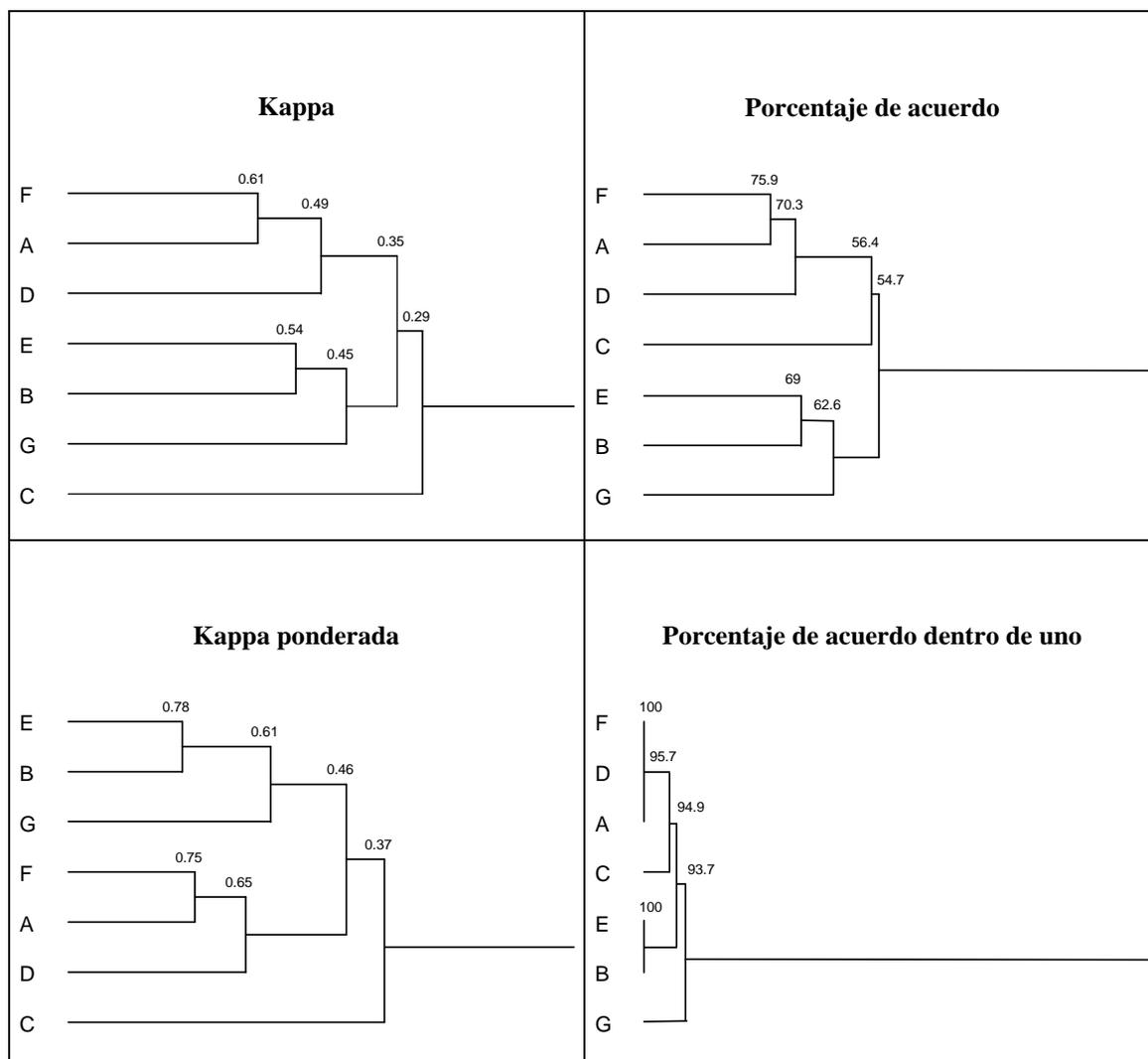
Tabla 7-8: Pesos de las etiquetas simbólicas en Kappa ponderada





En esta categoría los resultados obtenidos no son demasiado elevados. En concreto los mejores resultados se obtienen entre los expertos a/f, b/e, a/e, d/f, e/g, f/g y a/d, y los peores entre d/e, d/g. El experto C obtiene malos resultados con el resto de expertos. De esta forma se pueden catalogar como peores expertos a la hora realizar diagnósticos en esta categoría son D y C, mientras que A, B, E, F y G presentan un acuerdo mayor. Estos resultados corroboran los obtenidos en la categoría diagnóstica de la oxigenación.

Análisis Cluster



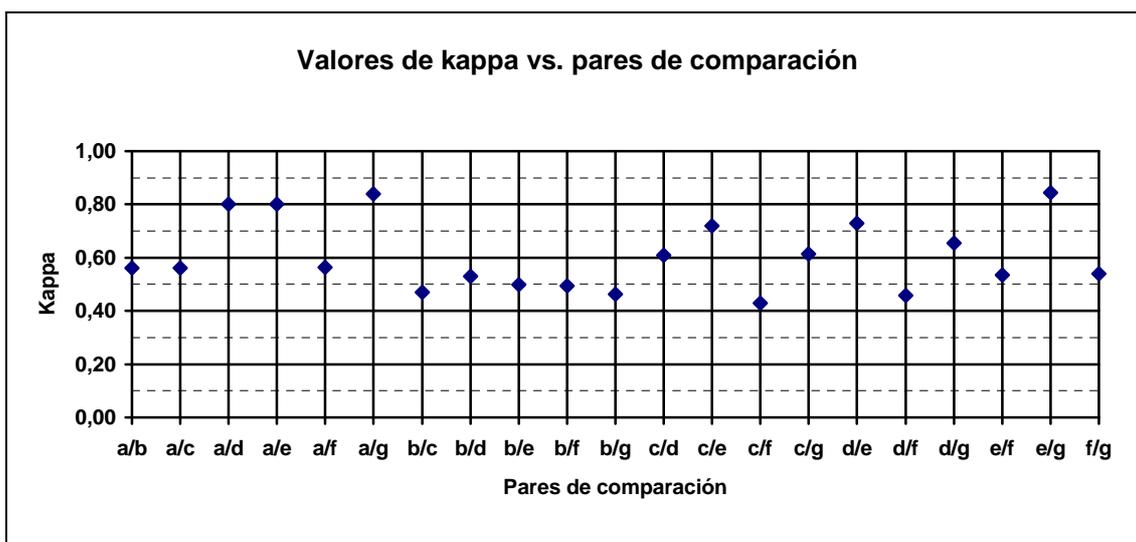
En el *análisis cluster* se repite siempre el mismo esquema: un cluster que agrupa a los expertos F, A y D; otro cluster que agrupa a los expertos E, B y al sistema experto; y por último el experto C que no encaja en ninguno de los dos clusters. La misma situación se repite en la categoría diagnóstica de la oxigenación.

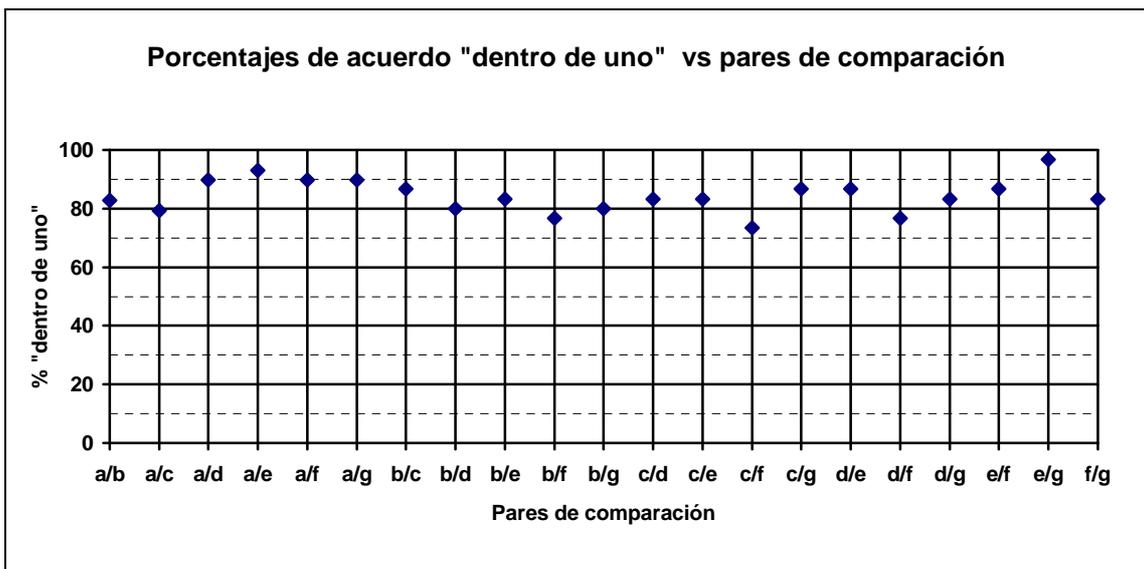
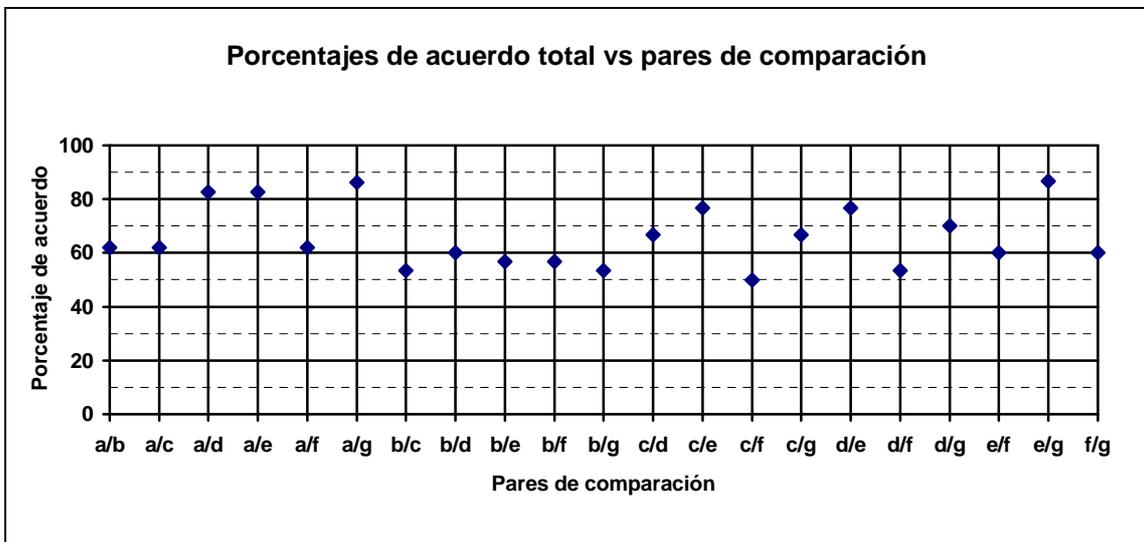
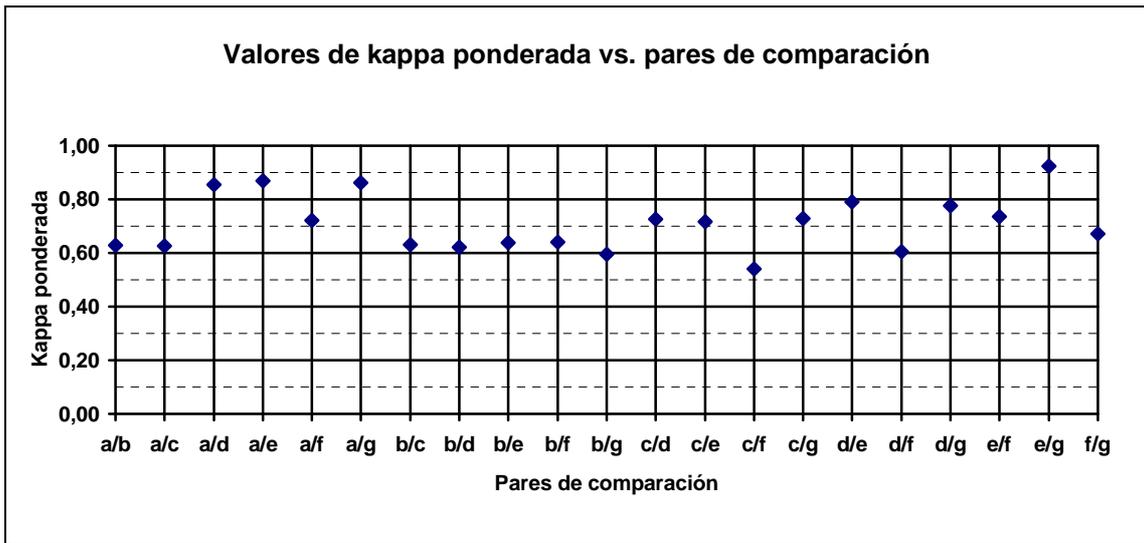
Analizando algunos datos de la validación se pueden sacar algunas conclusiones que expliquen los resultados. A la hora de diagnosticar la oxigenación del paciente, los expertos y el sistema experto difieren entre sí, porque los primeros utilizan el pCO_2 y el valor actual del FiO_2 como contexto y el sistema experto tan sólo el valor del pCO_2 . Sin embargo, en aspectos terapéuticos coinciden cualitativamente.

7.8 Resultados para la categoría diagnóstica de Balance ácido-base

Experto1 vs. Experto2	Normal	Acid Resp.	Acid. Met.	Alk. Resp.	Alk. Met.	Acid. Resp. Alk. Met. comp.	Acid. Met. Alk. Resp. comp.	Alk Resp. Acid. Met. comp.	Alk. Met. Acid. Resp. comp.	Acid. Resp. Acid. Met.	Alk. Resp. Alk. Met.
Normal	0	3	3	3	3	1	1	1	1	4	4
Acid. Resp.	3	0	1	6	6	1	2	5	4	1	7
Acid. Met.	3	1	0	6	6	2	1	4	5	1	7
Alk. Resp.	3	6	6	0	1	5	4	1	2	7	1
Alk. Met.	3	6	6	1	0	4	5	2	1	7	1
Acid. Resp. y Alk. Met. comp.	1	1	2	5	4	0	1	3	2	3	6
Acid. Met. Alk. Resp. comp.	1	2	1	4	5	1	0	2	3	3	6
Alk Resp. Acid. Met. comp.	1	5	4	1	2	3	2	0	1	6	3
Alk. Met. Acid. Resp. comp.	1	4	5	2	1	2	3	1	0	6	3
Acid. Resp. Acid. Met.	4	1	1	7	7	3	3	6	6	0	8
Alk. Resp. Alk. Met.	4	7	7	1	1	6	6	3	3	8	0

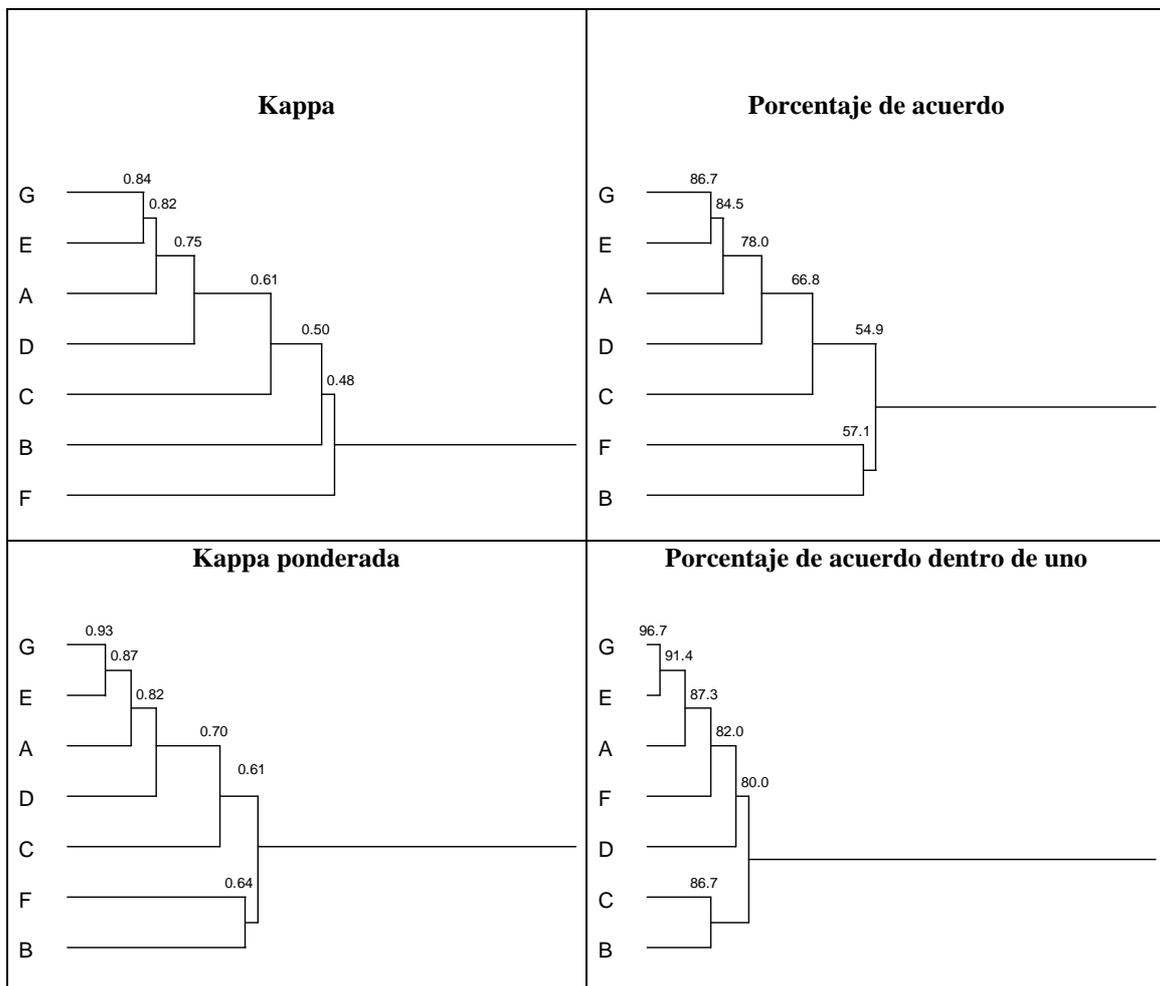
Tabla 7-9: Pesos de las etiquetas simbólicas en Kappa ponderada





Los resultados de las *medidas de concordancia* y del análisis *kappa* indican que existen una serie de expertos entre los cuales se dan los mayores índices de acuerdo: G, E, A y D. En el análisis de *kappa ponderada*, los mayores valores se dan entre los pares A/D, A/E, A/G, D/E, D/G y E/G. Por otra parte, los menores valores de acuerdo aparecen en aquellos pares en los que se encuentran los expertos B y F, mientras que los pares que contienen al experto C se mantienen en un nivel intermedio.

Análisis Cluster

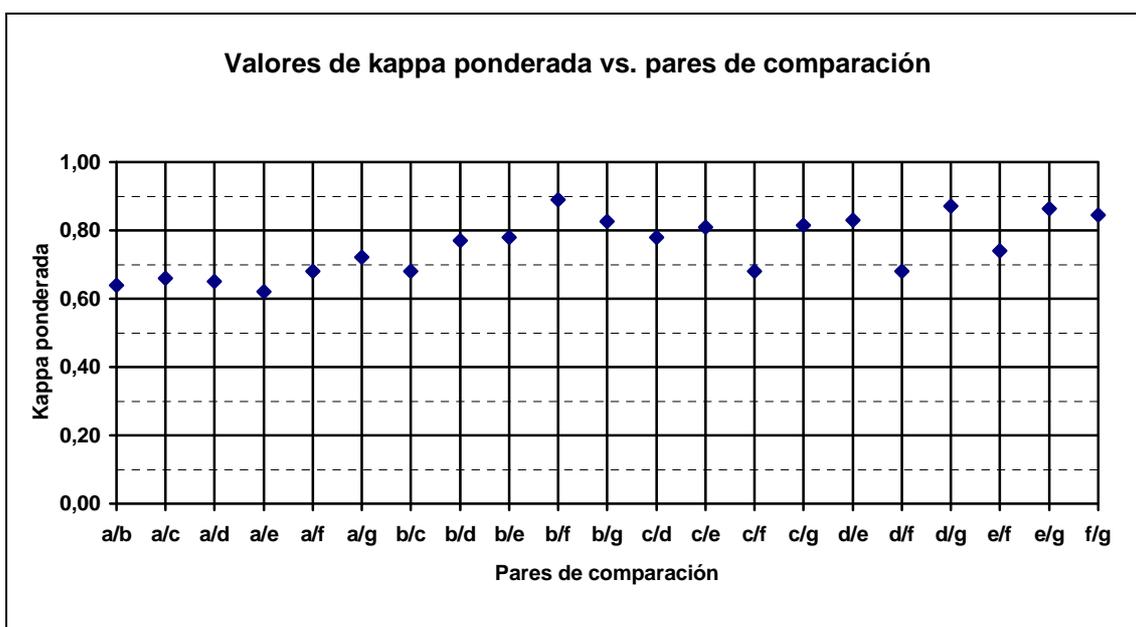
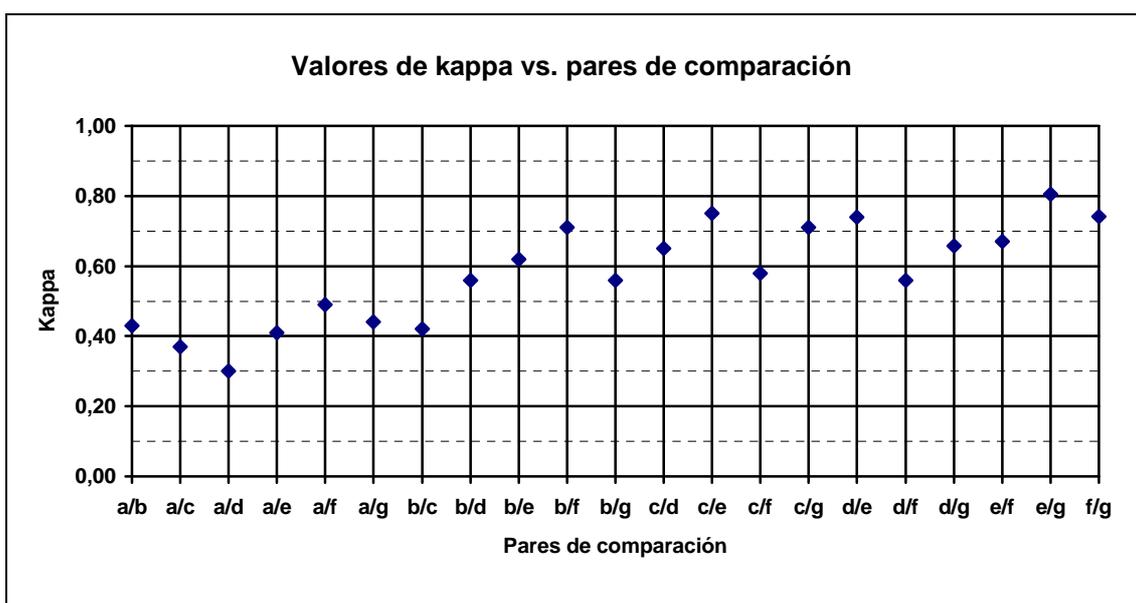


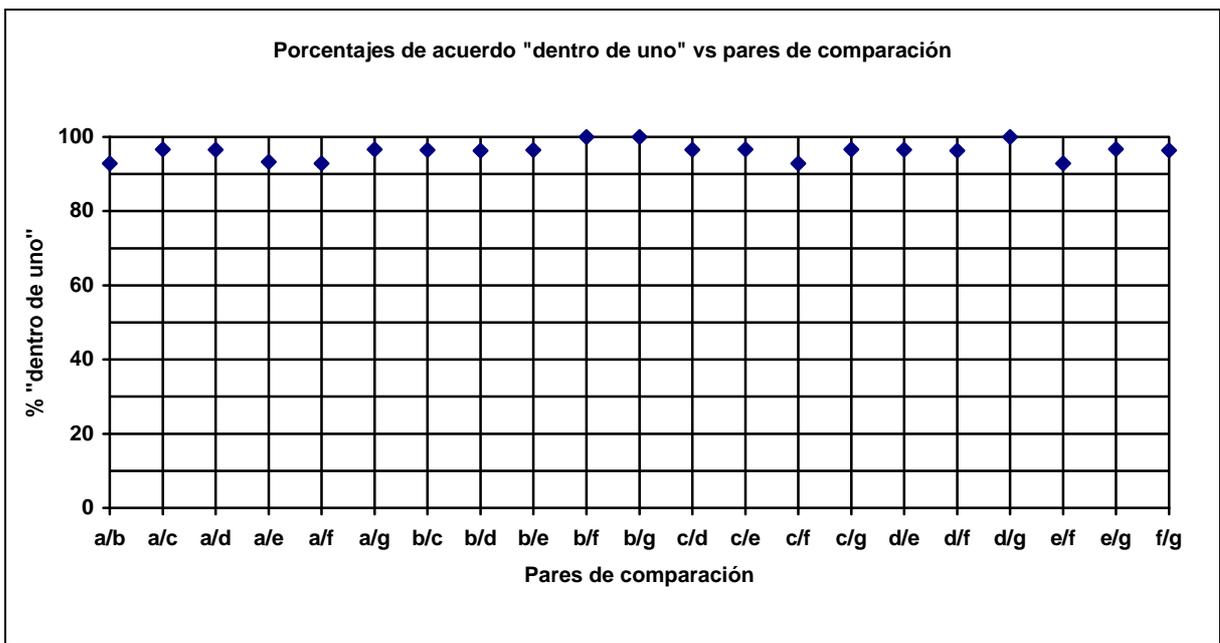
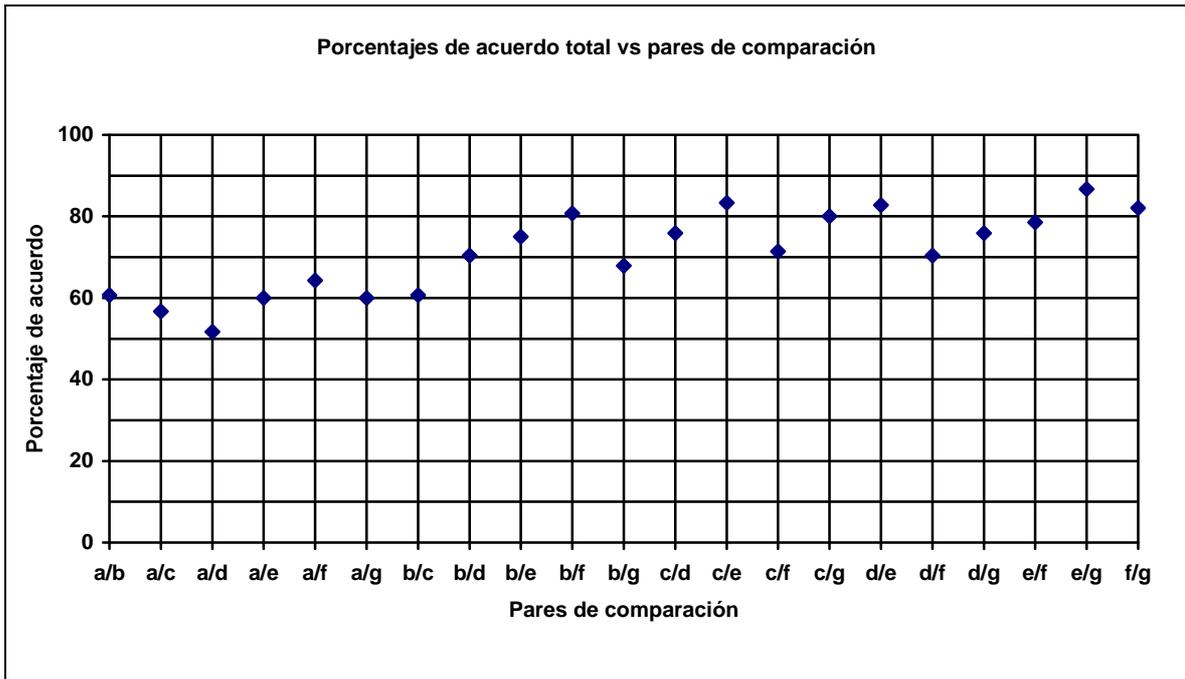
El análisis cluster demuestra el mismo esquema en las cuatro medidas. El primer cluster se formaría con los expertos G y E, a dicho cluster se añadirían a poca distancia los expertos A y D. Posteriormente se le añadiría un poco mas alejado el experto C y a más distancia los expertos B y F (los únicos cambios a este esquema aparecen en el porcentaje de acuerdo dentro de uno en el que la posición del experto F mejora).

7.9 Resultados para la categoría diagnóstica de Ventilación

Experto 1\Experto2	Incrementar	Mantener	Decrementar	Eliminar
Incrementar	0	1	4	9
Mantener	1	0	1	4
Decrementar	4	1	0	1
Eliminar	9	4	1	0

Tabla 7-10: Pesos de las etiquetas simbólicas en Kappa ponderada

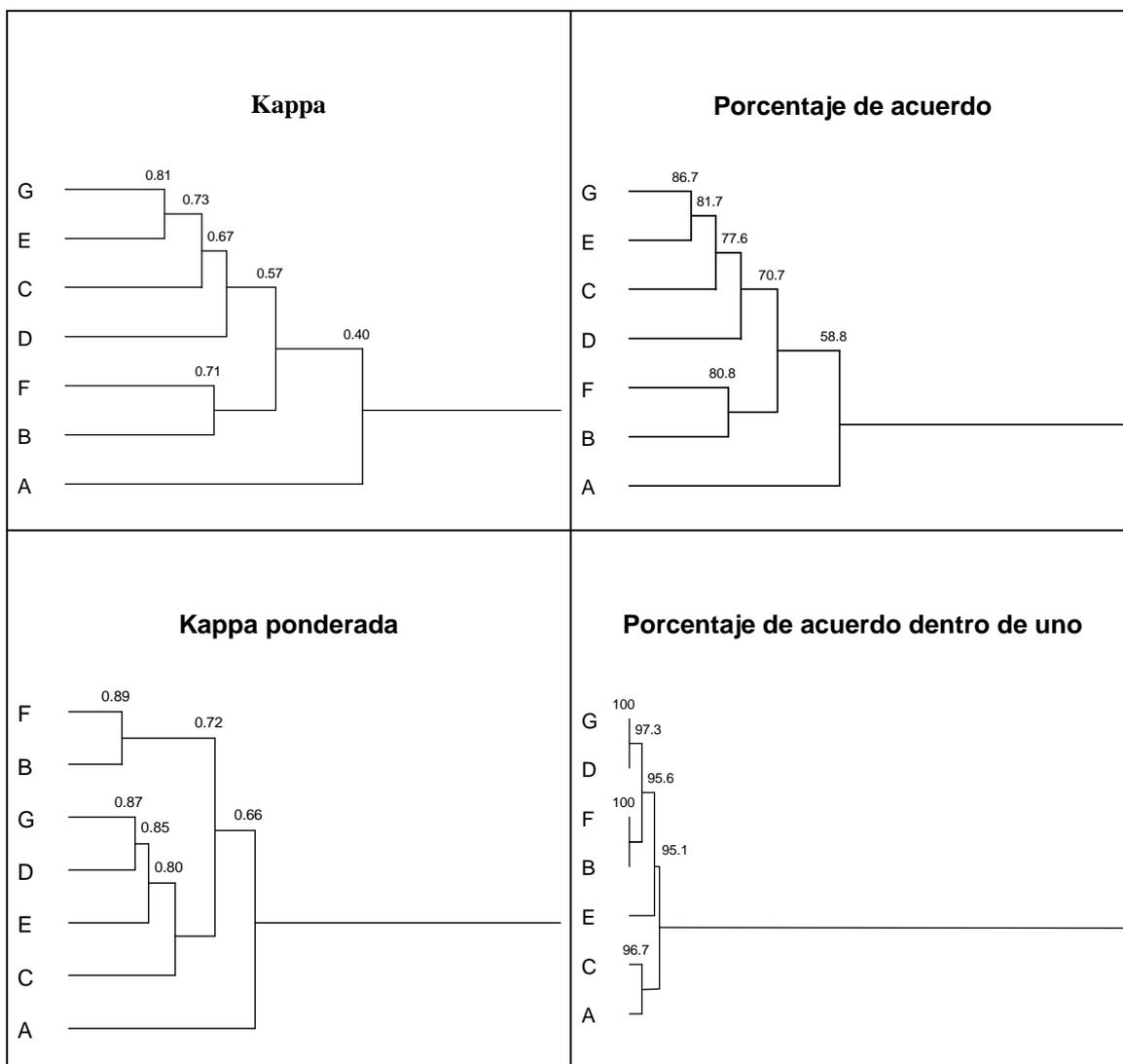




Los datos obtenidos a través de los porcentajes y los coeficientes *kappa* muestran que los resultados más bajos de concordancia aparecen entre el experto A y el resto de expertos. Los resultados más altos ocurren entre los pares B/F, C/E, C/G, D/E, E/G, F/G. Como se puede observar el sistema experto (G) se encuentra entre aquellos expertos que presentan un mayor grado de concordancia.

En general los resultados en esta categoría son muy buenos, y rara vez difieren en más de una categoría semántica, como se puede ver en el *porcentaje de acuerdo dentro de uno*.

Análisis Cluster



El análisis cluster repite de forma aproximada la misma estructura en los cuatro test. Así existe un cluster formado por los expertos F y B; otro cluster formado por los expertos G, E, D y C; y, por último, tenemos al experto A que se presenta aislado del resto de expertos.

7.10 Resumen

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en la validación del sistema experto PATRICIA, prototipo de campo integrado en la arquitectura de sistemas de monitorización propuesta en esta tesis. Esta tarea fue acometida siguiendo una metodología de validación propuesta para sistema inteligentes que, teniendo en cuenta

las características del sistema, el dominio de aplicación y las características de los datos, escoge las técnicas más adecuadas. Para el presente trabajo se utilizaron como medidas de concordancia los porcentajes de acuerdo y las medidas kappa, y como medidas de grupo, el análisis cluster para analizar el comportamiento de seis expertos y el sistema experto frente a problemas del dominio. Las pruebas arrojaron resultados satisfactorios ya que el el sistema experto se comportó como uno experto más. La mayoría de discrepancias en los diagnósticos son cuestiones de matiz lingüístico, asegurando de esta forma que en caso de error, la equivocación entra dentro de lo que podría considerarse admisible.

8. DISCUSIÓN

*A quien va usted a creer, ¿A mi, o a sus propios
ojos?
(Groucho Marx)*

8.1 Resultados de validación

Las validaciones preliminares realizadas sobre el prototipo de investigación del sistema experto PATRICIA, que aparecen en las Tabla 7-1 y Tabla 7-2, mostraron unos niveles de performance muy buenos. Sin embargo, y como se puede apreciar, el sistema parecía estar más de acuerdo con el experto humano que colaboró en el diseño del sistema que con el médico correspondiente que atendió el caso. Esta diferencia se debe fundamentalmente a la desviación natural que introdujo el experto cuando “enseñó” al sistema a partir de su propia experiencia. Así pues el prototipo estaba demasiado influenciado por el experto humano.

Por otra parte, el proceso de cesación de la ventilación mecánica es un proceso empírico, de tal forma que el médico debe elegir entre una serie de opciones encaminadas a la estabilización y subsecuente eliminación del soporte ventilatorio. La tarea de diagnóstico debe valorar gran cantidad de factores fisiológicos y ventilatorios que afectan al estado del enfermo, y la terapéutica debe elegir entre varias opciones perfectamente factibles de gestión ventilatoria. Todo ello queda reflejado en la Tabla 7-2, en la cual puede verse que los mayores porcentajes de acuerdo entre el sistema y el equipo médico se alcanzan en las tareas interpretativas de la oxigenación y la hemodinámica, mientras que los peores resultados aparecen a la hora de decidir una terapia ventilatoria.

Con la validación sobre el prototipo de campo se trató de demostrar la capacidad de diagnóstico y terapia del prototipo de campo frente a una serie de expertos. Se diseñó una metodología particular basada en métodos comunes de validación de sistemas expertos obtenidos a partir de la bibliografía. Al combinar distintas técnicas se puede aprovechar posteriormente las ventajas que presenta cada una de ellas. Así, en un primer paso se utilizaron técnicas como el análisis kappa o los porcentajes de acuerdo y luego se usaron dichas medidas para realizar un análisis cluster.

Las medidas de concordancia como el porcentaje de acuerdo, el porcentaje de acuerdo dentro de uno, kappa y kappa ponderada, aportan información complementaria

y adicional unas a otras. Así mientras los índices kappa y porcentaje de acuerdo tratan todos los desacuerdos entre expertos de la misma forma sin importar su gravedad, el índice kappa ponderada trata cada discrepancia según el peso asignado y el porcentaje de acuerdo dentro de uno considera como acuerdo aquellas discrepancias que se diferencian en una sola categoría semántica. De esta forma, si los desacuerdos no difieren en muchas categorías, los valores estas dos últimas medidas son generalmente más elevados que sus correspondientes medidas sin ponderar.

Los resultados obtenidos después de la aplicación de estas técnicas reflejan tres grupos de expertos, a tenor de la coincidencia de sus diagnósticos y terapias. Un primer grupo, A, E, y F que presentan buenos resultados en todas las categorías, un segundo grupo de dos expertos, B y D, con resultados dispares, y por último, el experto C que se sitúa en última posición en todas las categorías consideradas. Hay que destacar que esta división de los expertos coincide con la Tabla 7-3 donde se describía la categoría profesional y la experiencia de cada uno de los expertos utilizados en el proceso de validación. En dicha tabla aparecen tres expertos de alto nivel, dos de un nivel más bajo y un tercero residente en UCI. A pesar de no tener ninguna indicación de a qué experto correspondían qué datos, el proceso de validación puede haber identificado perfectamente a estos tres grupos.

Los resultados del sistema experto, el experto G, se sitúan entre los expertos que ofrecen concordancias más elevadas y los que presentan menores acuerdos. A pesar de ello, los resultados son similares a los que existen entre los propios expertos, con lo cual se puede concluir que el sistema experto actúa como un experto más en el dominio en el cual ha sido definido.

Del proceso de validación pueden extraerse una serie de conclusiones. Un dato importante que hay que destacar es que los resultados del sistema experto mejoran mucho más que el resto de expertos a la hora de realizar la ponderación de desacuerdos en el índice kappa ponderada. Este hecho se debe a que los desacuerdos “sistema experto-resto de expertos” son más bien cuestiones de matiz lingüístico, al seleccionar una categoría inmediatamente inferior o superior a la elegida por los expertos, lo cual pone de relieve la dificultad de categorizar semánticamente situaciones perfectamente definidas en el ámbito médico pero difíciles de etiquetar lingüísticamente. Así, como se

veía en la oxigenación, expertos que a la hora del diagnóstico discrepaban en una categoría semántica, coincidían en la decisión terapéutica.

Otra conclusión importante que la validación ha descubierto son los distintos comportamientos diagnósticos de los clínicos y la forma de utilizar los contextos. La categoría diagnóstica de oxigenación arrojaba malos resultados, en especial aparecían resultados negativos en el índice kappa que indicaban acuerdos menores que los debidos a la casualidad. Sin embargo, los clínicos arrojaban buenos resultados a la hora de establecer una terapia oxigenatoria adecuada y, lo que es más importante, también el sistema experto. Por tanto, se pudo demostrar que a la hora del diagnóstico utilizaban el valor del FiO_2 como contexto inferencial para explicar la situación oxigenatoria, mientras que el sistema experto sólo lo consideraba a la hora de decidir la terapia. En la categoría diagnóstica del balance ácido-base ocurrió algo semejante, ya que el médico obviaba los contextos naturales del paciente, mientras que sí eran tenidos en cuenta a la hora de prescribir la terapia ventilatoria.

El proceso de validación no debe verse como el paso final en la construcción del sistema experto, sino como una fase dentro del ciclo de vida que realimenta el resto de fases. En especial, los resultados de la validación pueden modificar aspectos del diseño o de la construcción del sistema experto, como fueron errores en la categorización semántica de la presión arterial, casos no contemplados en la base de conocimientos del balance ácido-base, o como se ha visto, el diferente tratamiento de los contextos en la tarea de diagnóstico y terapia.

8.2 Discusión del sistema

En esta memoria se describe el análisis, diseño, e implementación de un sistema de monitorización inteligente de pacientes dependientes de ventilación mecánica en Unidades de Cuidados Intensivos. La aproximación propuesta contempla una arquitectura cliente-servidor en la cual una estación local, con tareas explícitas de adquisición y preprocesado de datos, se conecta mediante una red de datos a una estación central, dedicada a tareas de gestión de comunicaciones y control de las estaciones locales, integración de datos e información simbólica de los pacientes, asesoramiento diagnóstico y terapéutico a través de un sistema experto y gestión de la base de datos del sistema global.

Un análisis del entorno hospitalario revela que en gran parte de las áreas médicas la informatización no existe o es muy deficitaria, limitándose en algunos casos a tareas administrativas. Además, y en unidades específicas como los cuidados intensivos, el trabajo que desarrolla el personal médico es en gran medida rutinario, dedicándose gran cantidad de tiempo y recursos en labores de documentación que restan dedicación al paciente. La solución descansa en las aportaciones informáticas de la mano de la Inteligencia Artificial y se llaman sistemas de monitorización inteligente.

Una configuración ideal considera la existencia de una estación central a la cual se conectan terminales de cabecera de pacientes desde los cuales se efectúa la recogida de datos a través de monitores fisiológicos. Desde el monitor central debe ser posible visualizar toda la información relativa el estado de cada enfermo, así como ajustar la estrategia de monitorización de cualquiera de los terminales. El ajuste debe ser fruto de una terapia clínica que bien puede ser sugerida por el módulo inteligente del sistema previa conformidad médica.

Sin embargo, en la actualidad, la informatización de las áreas hospitalarias, en especial el área de cuidados intensivos, puede resumirse en el término “islas de computación”. El paciente que ingresa en este tipo de unidades está sometido a una monitorización continua de sus constantes fisiológicas a través de la instrumentación biomédica. La tarea del personal clínico, una vez *iniciado* el proceso de monitorización, es la observación de cambios fisiológicos a través de los valores de los parámetros seleccionados y las pruebas de laboratorio, y el análisis de las discrepancias con el fin de prescribir una terapia adecuada tendente a mejorar el estado del paciente. De este proceso se genera una gran cantidad de datos, que es necesario clasificar, integrar e interpretar, con lo cual la labor médica se ve en gran medida sobrecargada. Surge entonces la necesidad manifiesta de un sistema de información que, en el ámbito UCI, realice tareas de monitorización inteligente y gestión de pacientes y que pueda integrarse con los sistemas del resto de áreas hospitalarias.

Así pues se propuso un esqueleto conceptual de tres módulos para la monitorización de pacientes en unidades de cuidados intensivos dependientes de ventilación mecánica. Este tipo de pacientes, incapaces de mantener un adecuado intercambio gaseoso, necesitan un apoyo mecánico. La meta última consiste en promover la respiración espontánea del paciente reduciendo el soporte ventilatorio a

medida que sus variables fisiológicas indican una mejoría en su estado. La estructura de tres componentes consiste en un módulo determinístico que se ocupa de planificar y realizar la adquisición de datos e información relevante, validar la entrada numérica y asignar interpretaciones clínicas a los parámetros numéricos considerando la idiosincrasia particular del paciente. Por otra parte, un módulo heurístico, a partir de la información simbólica del módulo determinístico, establece diagnósticos globales y prescribe directrices terapéuticas de acuerdo con la condición fisiopatológica del paciente. Por último, un módulo de control se encarga de implementar la estrategia temporal que priorice las distintas tareas de monitorización, optimizar la adquisición de la información y reorganizar el proceso de supervisión en función de los resultados de los dos módulos anteriores.

El conocimiento del sistema fue separado en conocimiento fisiológico, diagnóstico y terapéutico y conocimiento de control. El conocimiento fisiológico, representado como una red de clases y objetos, referencia todos aquellos parámetros fisiológicos del paciente que hacen referencia a su metabolismo, función respiratoria, oxigenación y estado hemodinámico y que determinan su condición general. Por otra parte, el conocimiento diagnóstico y terapéutico, modularizado en distintas bases de reglas, son protocolos clínicos publicados y/o de naturaleza heurística que guían la determinación del estatus fisiológico del paciente, es decir, el diagnóstico clínico, y proponen una terapia adecuada. Ambos son conclusiones adaptadas al paciente ya que la información que utiliza el sistema experto considera la idiosincrasia particular del enfermo. Por último, el conocimiento de control implementado dirige el proceso de inferencia. Adicionalmente, el módulo inteligente incorpora mecanismos de explicación sobre las conclusiones del sistema, de forma que los diagnósticos y terapias sugeridas están de algún modo justificadas.

La estructura modular propuesta necesita de una arquitectura física sobre la cual implementar el desarrollo. La aproximación cliente-servidor se adecúa perfectamente al entorno descrito y se acerca bastante a esa configuración ideal aludida. Así pues, una estación local, que actúa como cliente, incorpora al módulo determinístico a pie de cama del enfermo en un PC, para efectuar labores de recogida de datos y control de la instrumentación, preprocesado y envío de datos e información al servidor. Por otra parte, la estación central, que actúa de servidor, proporciona servicios de red y de base

de datos al resto de clientes, así como la integración, visualización y presentación de datos, señales e información de todos los pacientes al usuario médico. Entre ambos, una red de datos gestionada por el módulo servidor bajo un protocolo de transmisión fiable, actúa como medio de intercambio de mensajes entre estaciones.

Con esta implementación se ha integrado un conjunto islas de computación en un sistema adaptable ante cualquier crecimiento/decrecimiento del número de estaciones/conexiones. Además se ha tratado que el principio de modularidad presidiera la implementación de forma que cualquier modificación no repercutiera en resto de subsistemas. Es importante destacar que en este tipo de sistemas es importante asegurar la confidencialidad de los registros de datos del paciente protegiéndolos frente a estaciones no autorizadas. Por último, notar que a pesar de la posible heterogeneidad de sistemas operativos y plataformas hardware, la implementación está basada en la medida de lo posible, en estándares bien conocidos.

De la aplicación de la arquitectura cliente-servidor se pueden extraer una serie de beneficios. Entre ellos, destacar la posibilidad de conectar gran número de estaciones y monitores de cabecera sin impacto en el resto del sistema, la accesibilidad de datos a distintas estaciones y áreas hospitalarias, la seguridad en el acceso a los datos y la fiabilidad en las comunicaciones. Quizá más importante son las ventajas que aporta desde el punto de vista clínico, ya que mejora la asistencia al paciente puesto que los datos están disponibles de forma rápida, fiable y amigable a todo el personal clínico, permite aumentar la eficiencia del personal clínico gestionando la documentación y búsqueda de informes y reduce la carga de trabajo asumiendo las tareas de supervisión rutinarias de pacientes.

La arquitectura definida es totalmente independiente del sistema operativo que gobierna el funcionamiento de la estación, y por ello es adecuada para entornos clínicos en el cual la variedad de computadoras es un hecho. Sin embargo, hay que anotar un debe en la implementación, y es la ausencia de un protocolo estándar de comunicaciones que permita el intercambio de datos con todo tipo de dispositivos biomédicos. Es de esperar que el futuro obligue a la inclusión de dicho interfaz en el sistema.

9. CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES

Los aspectos más notables de la presente investigación pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. Planteamiento del desarrollo de una arquitectura eficiente para sistemas de monitorización inteligente en entornos de cuidados intensivos.
2. Los pacientes UCI se conectan a equipos de monitorización complejos y generan gran cantidad de datos que es necesario interpretar, correlacionar y almacenar. De esta forma, el médico sufre de una sobrecarga de información.
3. El personal clínico dedica gran parte de su tiempo a tareas de documentación y recuperación de informes de pacientes. Además, la tarea de monitorización es en su mayor parte una labor rutinaria de control de desviaciones.
4. La computerización de equipos en entornos UCI es escasa: núcleos de ordenador-instrumentación a pie de cama y aislados, sin comunicación entre ellos.
5. El sistema de monitorización inteligente debe interactuar con distintas fuentes de datos, adaptarse a los contextos del paciente para interpretar correctamente, reconocer datos erróneos e información inconsistente, establecer diagnósticos y terapias de acuerdo con el estado fisiopatológico del paciente y priorizar las tareas de monitorización. Por ello, el tiempo juega un papel importante.
6. El sistema debe considerar la organización de personal y la división de tareas en las unidades de cuidados intensivos, con el fin de que el impacto de su implantación sea mínimo.
7. Una configuración ideal del entorno UCI computerizado consiste en una serie de terminales de cabecera desde los cuales se efectúa la recogida y preprocesado de los datos, y un monitor central que visualiza el estado de cada uno de los pacientes y que permite ajustar cualquier parámetro de funcionamiento de los terminales.

8. La estructura modular propuesta para el sistema concibe tres módulos de proceso: el módulo determinístico, el módulo heurístico y el módulo de control temporal.

9. El módulo determinístico se ocupa de planificar y realizar la adquisición de datos e información relevante, detectar errores de instrumentación y asignar interpretaciones clínicas a los parámetros numéricos a la luz de las características particulares de los pacientes, es decir, el contexto específico. El preprocesado simbólico del módulo determinístico asigna a cada variable una etiqueta de un conjunto semántico propio comparando su valor con los rangos fisiológicos establecidos para la categoría de paciente en particular y considerando sus contextos naturales específicos.

10. El módulo heurístico es la parte inteligente y por medio de la información simbólica del módulo determinístico elabora diagnósticos globales y sugiere terapias adaptadas al paciente específico. El conocimiento heurístico del sistema se ha representado por medio de clases y objetos que implementan el conocimiento declarativo (variables fisiológicas del paciente), y reglas de producción que codifican el conocimiento procedimental, es decir, los protocolos que determinan la situación fisiopatológica del enfermo. Además, con el fin de facilitar el diseño y la verificación, dicho conocimiento se ha modularizado en distintas bases de reglas que comparten el espacio con clases y objetos.

11. El módulo de control se encarga de optimizar el proceso de adquisición, priorizar las distintas tareas de monitorización y reorganizar el proceso de supervisión general. Para ello define categorías de tiempo sobre los parámetros del paciente recogidos de la instrumentación. Para cada paciente se determinan tiempos de reevaluación de todos sus variables, y tiempos de persistencia, que indican cada cuanto es necesario volver a adquirir dicho valor.

12. La aplicación de la arquitectura cliente-servidor define dos tipos de estaciones: las estaciones locales (clientes), integradas por la instrumentación conectada al paciente y un ordenador front-end; y la estación central (servidor), a la cual se conectan el resto de estaciones por medio de una red de datos y que ejecuta tareas de control del sistema.

13. La interconexión de estaciones con la estación central se realiza a través de una red de datos, tipo Ethernet, bajo protocolo TCP/IP, que permite la transmisión de mensajes libre de errores. Para el intercambio de mensajes entre estaciones se utilizó el API del protocolo y los sockets, que permiten la implementación cualquiera que sea el sistema operativo de la máquina.

14. La estación local realiza procesos locales como la adquisición de datos y el procesado simbólico, mientras que la estación central se encarga de gestionar el tráfico de red y los accesos al sistema, además de gestionar la base de datos de los registros de paciente.

15. Como valor añadido, la estación central capacita al médico para ejecutar el motor de inferencias del sistema experto, con la información recibida de la estación local correspondiente. Las conclusiones del sistema se muestran en una ventana informativa con todos los datos numéricos del paciente y las sugerencias diagnósticas y terapéuticas obtenidas.

16. Los módulos de control de ambos tipos de estaciones utilizan la noción de evento como ciclo de ejecución de tareas. Se definen dos tipos básicos: los gráficos, disparados por la interacción del usuario, y los originados por las comunicaciones, a través de los flujos de entrada de datos (mensajes entre estaciones). Además, el módulo de control de la estación local incorpora eventos temporales, que guían el proceso de adquisición de datos. Con esta técnica, se logra que la estación realice sus tareas respondiendo a estímulos.

17. La validación del conocimiento del sistema se realizó con una validación retrospectiva del prototipo de campo contra 6 expertos del dominio. Además, y merced a que el sistema asocia a la salida una etiqueta lingüística de una escala correlativa, se pudieron utilizar medidas de concordancia que midieran las discrepancias entre expertos y sistema.

18. Los resultados de la validación indicaron que el sistema experto se comporta como un experto más. Sus desacuerdos con el resto son de tipo matiz lingüístico, por lo cual en caso de error, la equivocación se podría considerar admisible.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] S. Russel and P. Norvig, *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno*. Prentice-Hall, Méjico, 1996.

[2]. G.F. Luger and W.A. Stubblefield, *Artificial intelligence and the design of expert systems*. Benjamin-Cummings Publishing Company, California, 1989.

[3]. R. Reddy, The Challenge of Artificial intelligence, *Computer* 29 (10), 1996.

[4]. H.A. Simon, Artificial Intelligence: an empirical science, *Artificial Intelligence* 77, 1995, págs. 95-127.

[5]. A. Newell, A.J. Perlis and H.A. Simon, What is computer science?, *Science* 157, 1967, págs. 1373-1374.

[6]. M. Minsky. "A Neural-Analogue Calculator Based upon a Probability Model of Reinforcement," *Harvard University Psychological Laboratories, Cambridge, Massachusetts*, January 8, 1952.

[7]. A. Newell and H.A. Simon, The logic theory machine. *IRE Transactions on Information Theory*, IT-2(3), 1956, 61-79.

[8]. A. Newell and H.A. Simon, GPS: A program that simulates human thought. In *H. Billings (Ed.), Lernende automaten*, 1961, págs. 109-124.

[9]. J. McCarthy. Programs with Common Sense. Proceedings of the Symposium of the National Physics Laboratory, (1958), págs 77-84.

[10]. B. G. Buchanan, G.L. Sutherland and E.A. Feigenbaum. Heuristic DENDRAL: a program for generating explanatory hypothesis in organic chemistry. *Machine Intelligence*, 4, págs.209-254. Edinburgh University Press, Edinburgh, Scotland, 1969.

[11]. E.H. Shortliffe, MYCIN: A rule-based computer program for advising physicians regarding antimicrobial therapy selection. Ph.D. dissertation, Stanford University, 1974.

[12]. R. Duda, J. Gaschnig y P. Hart, Model design in the Prospector consultant system for mineral exploitation, *Expert Systems in the Microelectronic Age*, 1979, págs 153-167, Edinburgh University Press, Edinburgh, Scotland.

[13]. M.L. Minsky, A Framework for representing knowledge, *The Psychology of Computer Vision*, 1975, págs 211-277, McGraw-Hill, Nueva York.

[14]. J. McDermott, R1: A rule-based configurer of computer systems, *Artificial Intelligence*, 19(1) (1982), págs 39-88.

[15]. J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, 1988.

[16]. B. Blum, Clinical Information Systems: A review, *Western Journal of Medicine*, 1986, págs 145-791.

[17]. J. Pazos. De la informática convencional a la Inteligencia Artificial en Medicina, *Inteligencia Artificial en Medicina*, Fundación Alfredo Brañas, Santiago de Compostela, España, 1994.

[18]. F. Machlup, Semantic quirks in studies of information, *The study of information*, John Wiley and Sons, New York, 1983, págs 644-645.

[19]. E.H. Shortliffe and G.O. Barnett, Medical Data: Their acquisition, storage, and use, *Medical Informatics: Computer Applications in Health Care*, Addison-Wesley, 1990.

[20]. A.J. González y D.D. Dankel, *The engineering of knowledge-based systems: Theory and practice*, Prentice-Hall International, 1993.

[21]. A. Newell y H. Simon, Computer Science as empirical inquiry: Symbols and search, *Communications of the ACM*, 19(3), 1976, 113-126.

[22]. D.A. Waterman, A guide to expert systems, *Addison-Wesley*, 1996.

[23]. W.A. Martin y R.J. Fateman, The MACSYMA System, *Proceedings of the 2nd Symposium on Symbolic and Algebraic Manipulation*, Los Angeles, 1971, págs. 59-75.

[24]. H.E. Pople, J.D. Myers y R.A. Miller, DIALOG: A model for diagnostic logic for internal medicine, *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 4, 1975, págs. 848-875.

[25]. J.S. Aikins, J.C. Kunz, E.H. Shortliffe y R.J. Fallat, PUFF: An expert system for interpretation of pulmonary function data, *Computers and Biomedical Research* vol.16, 1983, págs. 199-208

[26]. L.D. Erman, F. Hayes-Roth, V. Lesser y D. reddy, The HEARSAY-II speech-understanding system: Integrating knowledge to resolve uncertainty, *Computing Surveys* vol.12, n. 2, 1980, págs. 213-253.

[27]. S.M. Weiss, C.A. Kulikowski y A. Safir, A model-based consultation system for the long-term management of glaucoma, *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 5, 1977, págs. 826-832.

[28]. V. Moret Bonillo y A. Alonso Betanzos, Fundamentos de Inteligencia Artificial, *Colección Manuales*, Servicio de Publicaciones, Universidad de A Coruña, 1998 (en imprenta).

[29]. F. Hayes-Roth, D.A. Waterman y D.B. Lenat, *Building Expert Systems*, Addison-Wesley, 1983.

[30]. E. Castillo y E. Álvarez, *Sistemas Expertos: aprendizaje e incertidumbre*, Paraninfo, 1989.

[31]. M. Lipkin y J.D. hardy, Mechanical correlation of data in differential diagnosis of hematologic diseases, *Journal of the American Medical Association*, n°.166, 1958, págs. 113-125.

[32]. R.S. Ledley y L.B. Lusted, Reasoning foundations of medical diagnosis, *Science*, n° 130, 1959, págs. 9-21.

[33]. H.R. Warner, A.F. Toronto y L.G. Veasy, Experience with Bayes' theorem for computer diagnosis of congenital heart disease, *Annals of the New York Academy of Science*, nº 152, 1964, pág. 2.

[34]. E. Coiera, Medical Informatics, *Australian Medical Journal*, nº 160, 1994, págs. 438-440.

[35]. E. Coiera, *Guide to Medical Informatics, the Internet and Telemedicine*, Chapman & Hall, 1997.

[36]. P.L. Miller, Artificial Intelligence in Medicine: An emerging discipline, *Selected topics in Medical Artificial Intelligence*, New York, Springer-Verlag, 1988.

[37]. A. Alonso Betanzos, Perspectiva simbólica de la Inteligencia Artificial en Medicina, *Inteligencia Artificial en Medicina*, Fundación Alfredo Brañas, Santiago de Compostela, España, 1994.

[38]. E. Coiera, Artificial Intelligence Systems in Routine Clinical Use, [on-line]. Dirección URL: <http://www-uk.hpl.hp.com/people/ewc/list.html>, Última actualización: 16-Dec-1997.

[39]. S. Uckun, Intelligent Systems in Patient Monitoring and Therapy Management: A survey of research projects, *Technical Report KSL 93-32*, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, 1993.

[40]. F.A. Mora, G. Passariello, G. Carrault y J.P. Le Pichon, Intelligent patient monitoring and management systems: A review, *IEEE Engineering In Medicine and Biology Society Magazine*, vol. 12, nº.4, 1993, págs.23-33.

[41]. AIM-INFORM, International Journal of Monitoring and Control, vol.8, 1991, págs. 189-199.

[42]. J. Blom, The Simplexys Experiment: Real Time Expert Systems in patient Monitoring, *PhD Dissertation*, Eindhoven University of technology, Division of Medicalk Electronics, Holanda, 1990.

[43] J. Rasmussen, Skills, rules, knowledge; signals, signs and symbols; and other distinctions in human performance models, *IEEE Transactions on System, man and Cybernetics*, vol.13, nº.3, 1983.

[44]. V. Moret Bonillo, A. Alonso Betanzos, E. García Martín, M. Cabrero Canosa y B. Guijarro Berdiñas, The PATRICIA Project: A semantic-based methodology for intelligent monitoring in the ICU, *IEEE Engineering In Medicine and Biology Society Magazine*, vol. 12, nº.4, 1993, págs.59-68.

[45]. V. Moret Bonillo, M.J. Cabrero Canosa y E. Hernández Pereira, Integration of data, information and knowledge in intelligent patient monitoring, *Expert Systems with Applications*, vol. 15, 1998, (en imprenta).

[46]. J.P. Kassirer y G.A. Gorry, Clinical Problem Solving: A Behavioral Analysis, *Annals of Internal Medicine*, vol. 89, 1978, págs. 245-255.

[47]. R.S. Ledley y L.B. Lusted, Reasoning Foundations of Medical Diagnosis, *Computer-Assisted Decision Making*, Springer-Verlag, New York, 1985.

[48]. V. Maojo, Modelos computacionales del razonamiento médico, *Inteligencia Artificial en Medicina*, Fundación Alfredo Brañas, Santiago de Compostela, España, 1994.

[49]. J. Kassirer y R. Kopelman, *Learning Clinical Reasoning*, Williams and Wilkings, Baltimore, EEUU, 1991.

[50]. D. K. Owens y H.C. Sox, Medical Decision Making: Probabilistic Medical reasoning, *Medical Informatics: Computer Applications in Health Care*, Addison-Wesley, 1990.

[51]. E.H. Shortliffe, Clinical Decision-Support Systems, *Computer-Assisted Decision Making*, Springer-Verlag, New York, 1985.

[52]. E.H. Shortliffe y G.O. Barnett, Medical Data: Their acquisition, storage and use, *Computer-Assisted Decision Making*, Springer-Verlag, New York, 1985.

[53]. D.P. Wagner, T.D. Wireland y W.A. Knans, The hidden cost of treating severely ill patients: charges and resource consumption in an intensive care unit, *Health Care Financial Review*, vol. 5, 1983, págs. 81-86.

[54]. R.M. Gardner, Patient Monitoring Systems, *Medical Informatics: Computer Applications in Health Care*, Addison-Wesley, 1990.

[55]. R.M. Gardner, Computerized data management and decision making in critical care, *Surgical Clinics of North America*, vol. 65, n°. 4, 1985, págs 1041-1051.

[56].IEEE P1073 Standard for Medical Device Communications, Draft 3.0, IEEE, New York, 1992. Disponible en: <http://grouper.ieee.org/groups/mib/index.html>

[57]. HL7, An application protocol for electronic data exchange in healthcare environments, v.3.1. Disponible en: <http://www.mcis.duke.edu/standards/HL7/hl7.htm>.

[58]. G.J. Kuperman, R.M. Gardner y T.A. Pryor, HELP: A dynamic Hospital Information System, *Springer-Verlag*, New york, 1991.

[59]. E.H. Shortliffe, Computer-based clinical decision aids: Some practical considerations, *Proceedings of First Conference of American Medical Informatics Association*, 1982, págs. 295-298.

[60]. A.S. Tonnesen, Benefits of Electronic Patient Record, [on-line] Available World Wide Web <http://oa3c.hsc.uth.tmc.edu/~atonsense/benefits.html>, 1996.

[61] J.G. Anderson y S.J. Aydin, Evaluating the impact of health care information systems, *International Journal of Technology Assesment in Health Care*, vol. 13, n°.2, 1997, págs. 380-393.

[62]. J.G. Anderson, Clearing the way for physicians' use of clinical information systems, *Communications of the ACM*, vol. 40, n°. 8, 1997, págs. 83-90.

[63]. L.M. Fagan, VM: Representing time-dependent relations in a medical setting, *Ph.D. Dissertation*, Computer Science Dept., Stanford University, CA, 1980.

[64] L.M. Fagan, E.H. Shortliffe y B.G. Buchanan, Computer-based medical decision making: From MYCIN to VM, *Automedica*, vol. 3, 1980, págs. 97-106.

[65]. J.S. Aikins, J.C. Kunz, E.H. Shortliffe y R.J. Fallat, PUFF: An expert system for interpretation of pulmonary function data, *Computers and Biomedical Research*, vol. 16, 1983, págs. 199-208.

[66]. C. Hernández Sande, V. Moret Bonillo y A. Alonso Betanzos, ESTER: An expert system for management of respiratory weaning therapy, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol.36, n°.5, 1989, págs. 559-564.

[67]. W.A. Knauss, E.A. Draper, D.P. Wagner y J.E. Zimmerman, APACHE-II: A severity of disease classification system, *Critical Care Medicine*, vol. 13, n°. 10, 1985, págs. 818-829.

[68]. R. Rudowski, C. Fostell y H. Gill, A knowledge-based support system for mechanical ventilation of the lungs. The KUSIVAR concept and prototype, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 30, 1989, págs. 59-70.

[69]. D.A. Tong, Weaning patient from mechanical ventilation: A knowledge-based system approach, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 35, 1991, págs. 267-278.

[70]. D.A. Tong, E.B. Golden, S.A. Napper, WEANPRO: A WEANing PROtocol expert system, *Proceedings of 11th Annual Conference IEEE-EMBS*, 1989, págs. 1857-1858.

[71]. B. Hayes-Roth, R. Washington, D. Ash, R. Hewett, A Collinot, A. Vina y A. Seiver, GUARDIAN: A prototype intelligent agent for intensive-care monitoring, *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 4, 1992, págs. 165-185.

[72]. Y. Shoham, Agent-oriented programming, *Artificial Intelligence*, vol. 60, 1993, págs. 139-169.

[73]. B.M. Dawant, S. Uckun, E.J. Manders y D.P. Lindstrom, SIMON: A distributed computer architecture for intelligent patient monitoring, *Expert System with Applications, Special Issue on medical Applications of Expert Systems*, vol.6, n°4, 1993, págs. 411-420.

[74]. S. Miksch, W. Horn, C. Popow y F. Paky, VIE-VENT: Knowledge-based monitoring and therapy planning of the artificial ventilation of newborn infants, *Proceedings of 4th Conference on Artificial Intelligence in Medicine Europe AIME'93*, 1993, págs. 218-229.

[75]. S. Miksch, W. Horn, C. Popow y F. Paky, Utilizing temporal data abstraction for data validation and therapy planning for artificially ventilated newborn infants, *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 8, 1996, págs. 543-576.

[76]. M. Dojat, F. Pachet, Z. Guessoum, D. Touchard, A. Harf y L. Brochard, Nèoganes: A working system for the automated control of assisted ventilation in ICUs, *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 11, 1997, págs. 97-117.

[77]. *IEEE Standards Collection: Software Engineering*, IEEE Standard 610.12-1990, IEEE, 1993.

[78]. R. S. Pressman, Ingeniería del software: Un enfoque práctico, *McGraw-Hill*, 1997.

[79]. K. Simpson y M. Gordon, The anatomy of a clinical information system, *British Medical Journal*, n°. 316, 1998, págs. 1655-1658.

[80]. B. Thull, H. Popp y G. Rau, Man-Machine Interaction in Critical Care Settings, *IEEE Engineering In Medicine and Biology Society Magazine*, vol. 12, n°.4, 1993, págs. 42-49.

[81]. V. Moret Bonillo, A. Alonso Betanzos, B. Arcay Varela y C. Hernández Sande, An approach to intensive care monitoring that combines deterministic and heuristic techniques, *Journal of Clinical Engineering*, vol.15, n°.1, 1990, págs. 35-43.

[82]. V. Moret-Bonillo, A. Alonso-Betanzos y C. Hernández Sande, Implementing cognitive procedures in diagnostic processes, *Proceedings of 11th Annual International Conference IEEE Engineering in medicine and Biology Society*, 1989, págs. 1867-1868.

[83]. V. Moret-Bonillo y A. Alonso-Betanzos, Uncertainty based approach for symbolic classification of numeric variables in Intensive Care Units, *Journal of Clinical Engineering*, vol. 15, n° 5, 1990, págs. 361-369.

[84]. E. Hernández-Pereira, M. Cabrero-Canosa y V. Moret-Bonillo, Symbolic preprocessing and quantification of clinical parameters, *Proceedings of 5th International Symposium on Biomedical Engineering*, vol. 5, 1994, págs. 31-32.

[85]. G. Lakemeyer y B. Nebel, Foundations of Knowledge Representation and Reasoning: A Guide to this Volume, *Springer-Verlag*, 1994, págs. 1-12.

[86]. D.G. Bobrow, Representation and Understanding, *Academic Press*, 1975.

[87]. NEXPERT Object 2.0, Manual de Referencia, Neuron Data Inc., 1991.

[88]. B. Arcay Varela, C. Hernández Sande, R. Balsa y J.E. Arias, Microcomputer-controlled weaning from mechanical ventilation using temporal knowledge, *Innovation Technology and Biological Medicine*, vol. 13, n°. 2, 1992, págs. 219-227.

[89]. D.G.R. Biowne, Weaning patients from mechanical ventilation, *Intensive Care Medicine*, vol. 10, 1984, págs. 55-58.

[90]. D.A. Tong, Weaning patient from mechanical ventilation. A knowledge-system approach, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 35, 1991, págs. 267-278.

[91] M.J. Tobin, D.R. Dantzker, Mechanical ventilation and Weaning, *Cardiopulmonary Critical Care*, Grunne & Stratton, 1986.

[92]. W.J. Clancey, The epistemology of a rule-based expert system: A framework for explanation, *Artificial Intelligence*, n°. 20, 1983, págs. 215-251.

[93]. J. Meyer-Fujara, B. Heller, S. Schlegelmilch, Y. Wachsmuth, *Lecture Notes in AI*, Proceedings of 18th German Annual Conference on AI, B. Nebel y L. Dreschler-Fischer (eds), 1994, págs. 214-225.

[94]. S.L. Klein, A glossary of ANESTHESIA and related terminology, *Medical Examination Publishing Co.*, 1984.

[95]. R.M. Black, Metabolic Acid-Base Disturbances, *Intensive Care Medicine*, J.M. Rippe, R.S.Irwin, J.S. Alpert y J.E. Dalen (eds), 1985.

- [96]. M.C. Fishman, A.R. Hoffman, R.D. Klausner y M.S. Thaler, *Medicine*, J.P.Lippincott Co., 1985.
- [97]. M.J. Tobin y D.R. Dantzker, *Mechanical Ventilation and Weaning, Cardiopulmonar Critical Care*, Grune & Stranton, 1986.
- [98]. G.N. Olinger y W.J. Schulte, *Respiratory Insufficiency, Manual of Surgical Therapeutics*, R.E. Condon y L.M. Nyhus (eds.), 1978.
- [99]. G. Wiederhold y L.E. Perreault, *Hospital Information Systems, Medical Informatics: Computer Applications in Health Care*, Addison-Wesley, 1990.
- [100]. IBM, AS/400 Client Server Computing, disponible en: <http://www.as400.ibm.com/vans/whatis/whatis.htm>, 1995
- [101]. L.L. Taylor, Client/Server Frequently Asked Questions, disponible en: <http://www.abs.net/~lloyd/csfaq.txt>
- [102]. J.T. Malone, The Client-Server Computing Page, disponible en: <http://www.wenet.net/~jtmalone/ClientServerFAQ.html>, 1997.
- [103]. J. Newmarch, Client-Server Computing:Unix Sockets and RPC, *Universidad de Camberra, Australia*, disponible en: <http://pandonia.canberra.edu.au/ClientServer/>
- [104]. W.R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The protocols*, Addison Wesley Longman, 1994.
- [105]. Borland Delphi Client/Server Suite Versión 2.0, 1996.
- [106]. E. Hernández Pereira, *Adquisición de datos e información e interconexión de módulos en el sistema experto PATRICIA*, Tesis de Licenciatura, Dpto. de Computación, Universidad de A Coruña, 1996.
- [107]. E. Coiera, Incorporating user and dialogue models into the interface design of an intelligent patient monitor, *Medical Informatics*, vol. 16, nº. 4, 1991, págs. 331-346.
- [108]. J.K. Ousterhout, *Tcl and the Tk Toolkit*, Addison-Wesley Publishing, 1994.

[109]. B. Welch, Practical programming in Tcl and Tk, *Prentice Hall*, 1997.

[110]. V. Moret Bonillo, E. Mosqueira Rey y A. Alonso Betanzos, Information analysis and validation of intelligent monitoring systems in intensive care units, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 1, nº. 2, 1997, págs. 87-99.

[111]. E. Mosqueira Rey, Diseño de técnicas de validación de sistemas inteligentes: Aplicación a un caso práctico, Tesis de Licenciatura, Dpto. Computación, Universidad de A Coruña, 1995.

[112]. G.J. McLachlan, Cluster analysis and related techniques in medical research, *Statistical Methods in Medical Research*, vol. 1, 1992, págs. 27-48.

[113]. J.R. Slagle, S.M. Finkelstein, L.A. Leung y J.W. Warwick, Monitor: an expert system that validates and interprets time-dependent partial data based on a cystic fibrosis home monitoring program, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 36, 1989, págs. 552-558.

[114]. J. Cohen, Weighted Kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement of partial credit, *Psychology Bulletin*, vol. 70, nº. 4, 1968, págs. 213-220.