

SISTEMA EDUCATIVO COMPUTACIONAL PARA EL
SUMINISTRO DE ANESTESIA

Ing. Sara Croitoru Eisenstein
Ing. Vivian Luchau Botero
Doctor Jorge Mejía

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE SISTEMAS
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
BOGOTA, COLOMBIA

RESUMEN:

El objetivo de este sistema es ofrecer una herramienta educativa que permita, tanto al Médico Anestesiólogo como al estudiante de medicina, practicar sus conocimientos de suministro de anestesia en un paciente hipotético durante la simulación de una cirugía. Así, el usuario puede reconocer los efectos de sus acciones sobre el paciente sin los riesgos que esto supone en la vida real.

El sistema está orientado a dos tipos de usuarios: un "experto", que lo alimenta con el conocimiento médico necesario y un usuario "estudiante", que administra anestesia al paciente durante la simulación de la cirugía. Para el usuario "experto" se desarrollaron herramientas que permiten editar el conocimiento y para el "estudiante", un programa que lleva a cabo la simulación.

Para obtener los efectos de las drogas inhaladas e intravenosas en el paciente se utilizaron dos modelos farmaco-cinéticos, los cuales fueron implementados mediante técnicas de control. Para combinar dichos efectos, se utilizaron técnicas de sistemas expertos que permitieron separar el conocimiento del programa, facilitando así las labores de validación y complementación del conocimiento.

Actualmente, las herramientas computacionales para el funcionamiento del sistema se encuentran desarrolladas; sin embargo, debido a la complejidad y cantidad del conocimiento involucrado, no ha concluido la tarea de obtención y validación de este.

El sistema fué desarrollado en Turbo Pascal y funciona bajo sistema operacional DOS en máquinas IBM PC y compatibles con 512K de memoria principal.

Introducción

El uso de los computadores en medicina ha adquirido cada vez más importancia debido a la progresiva complejidad de la práctica médica y gracias al desarrollo de herramientas, sencillas de manejar, que apoyan al médico en su labor diaria.

Dentro de la medicina los sistemas computacionales han tenido una buena acogida en el campo de la educación. Se destacan especialmente los Sistemas Expertos que guían al estudiante en la labor de diagnóstico, y los Simuladores los cuales permiten enfrentar al estudiante con situaciones clínicas especiales.

Particularmente, en el área de anestesia se han desarrollado sistemas que apoyan en la determinación del plan anestésico y en la administración de anestésicos inhalados. Luego de revisar bibliografía referente a dichos sistemas, decidimos utilizar otro enfoque.

Inicialmente nos planteamos como objetivo desarrollar un sistema capaz de simular algunos de los aspectos del cuerpo humano sometido a una cirugía y bajo el efecto de las drogas que comunmente se administran durante la anestesia (anestésicas o no), con el objeto de permitir a los médicos y/o estudiantes de medicina observar las acciones que estos medicamentos despiertan en el organismo.

De esta manera, al disponer de un paciente simulado, el usuario puede practicar sin riesgos sus conocimientos y aprender a reconocer los efectos de sus acciones sobre el paciente, para diferenciarlos de aquellos derivados de otros factores (como, por ejemplo, enfermedad); adquiriendo así una actitud vigilante en cuanto a las variaciones que pueda inducir sobre sus pacientes. Además, una vez el sistema cuente con una base de conocimiento más completa, el usuario podrá aprender cómo reaccionan ante la anestesia pacientes con alteraciones fisiopatológicas poco comunes, casos a los cuales el médico puede no tener acceso durante su período de entrenamiento formal.

Una vez definidos los objetivos del sistema, decidimos utilizar modelos farmacológicos desarrollados por expertos, validados y publicados. Así, escogimos el modelo de drogas inhaladas de W.W. Mapleson (1976) y un modelo farmacocinético bicompartimental publicado por M. Wood (1985).

Luego, desarrollamos un modelo fisiológico basados en la recopilación de información proveniente de textos, consultas con expertos y artículos.

Dadas las características de la información recopilada, ⁷⁶²- decidimos que lo más conveniente era desarrollar, desde el punto de vista computacional, un sistema compuesto por:

- técnicas de control para el manejo de los modelos farmacocinéticos (el inhalado y el intravenoso)

- un sistema experto que, a partir de los datos generados por los modelos, simulara el efecto de las drogas y procedimientos sobre el paciente.

Con la finalidad de reforzar el carácter educativo del sistema, se diseñó un módulo que permitiese mantener un registro de los cambios producidos durante la simulación, con el fin de permitir al usuario entender las alteraciones producidas por los medicamentos sobre las variables del paciente.

Por ser el sistema modular, el usuario tiene la posibilidad de modificar el conocimiento de tipo médico para actualizarlo y ampliarlo con la nueva información que vaya obteniendo.

Objetivos del Sistema

El objetivo fundamental del sistema MECCA es contribuir en la educación de los médicos para el suministro de anestesia, ofreciendo al usuario otra alternativa para practicar sus conocimientos teóricos, con la garantía de eliminar el riesgo que esto implica para un paciente, presentándole un caso hipotético en el cual el computador tiene el papel de paciente y el usuario el de médico anestesiólogo.

El objetivo del sistema no es enseñar al estudiante cómo determinar un plan anestésico, sino permitirle aplicar sus conocimientos planteando él mismo el plan anestésico y observando el efecto que tiene sobre el paciente. Se busca ofrecerle un modelo que le permita realizar una estrategia adecuada para la vigilancia sobre el paciente durante la anestesia, luego de haber elaborado un plan anestésico y observar los efectos de sus acciones sobre el paciente hipotético.

En general, la contribución educativa que ofrecerá el sistema al estudiante es permitirle practicar otro tipo de razonamiento diferente al que él utiliza en sus clases teóricas ; cuando el estudiante adquiere una serie de conocimientos teóricos se encuentra en un ambiente de estudio en el cual se utiliza un razonamiento que va desde las causas a las consecuencias (de la enfermedad a los síntomas), pero en el ambiente de trabajo el razonamiento es al inverso, se reconoce la causa a partir de las consecuencias (se diagnostica la enfermedad a partir de los síntomas). Esto se refuerza gracias a que el sistema permite llevar un registro de los cambios ocurridos a las variables (es decir, de los cambios de estado sucesivos del paciente), para que el usuario no experto analice y verifique el porqué de una reacción del paciente, ofreciéndole una explicación teórica que justifique dicho cambio.

El sistema le ofrece al profesor (médico experto) la posibilidad de complementar sus clases teóricas, con casos en los cuales se puedan destacar los aspectos importantes sin poner en peligro la vida de un ser humano, y permitiéndole manipular las características del paciente.

Delimitación

La anestesia consiste en un bloqueo de la sensibilidad a los estímulos dolorosos.

Hay dos tipos de anestesia : General y Regional.

La anestesia general se define como un estado transitorio de inconsciencia producida por agentes anestésicos, con pérdida de las sensaciones en todo el cuerpo.

La anestesia regional es capaz de bloquear la conducción nerviosa de los impulsos. Esta acción es reversible y hay una recuperación completa de la función fisiológica. Pero a diferencia de la anestesia general no produce estado de inconsciencia.

La administración de anestesia general requiere de un control más cuidadoso del estado del paciente debido a su complejidad y riesgo.

La anestesia regional es un procedimiento que requiere habilidad manual, la cual no se puede adquirir mediante el uso de un modelo computacional, sino mediante práctica con pacientes.

Gran parte de las cirugías se realizan con anestesia general, motivo por el cual en este sistema se escogió la técnica de anestesia general y por ende el tipo de cirugías que puedan requerir de ésta.

El control del cuerpo humano durante la anestesia es bastante complejo, por lo cual sería necesario tener en cuenta (medicamente) todo lo que ocurre en el paciente. Sin embargo por simplicidad académica, es necesario hacer algunas restricciones sobre los tipos de drogas a utilizar, los anestésicos, tipos de cirugías y variables a controlar.

De todas maneras la estructura del sistema MECCA está en capacidad de aceptar todo el conocimiento que el usuario experto desee tener en cuenta.

Se tomará como referencia una historia clínica definida por el usuario experto. En este caso se ha probado con un paciente sin ninguna otra complicación adicional al motivo de la intervención, sobre el cual se pueden realizar cirugías previamente definidas al sistema. (Actualmente se ha probado con apendicectomía).

El Sistema permite la administración del anestésico que el usuario seleccione, ya sea solo o asociado a otros anestésicos en cualquier momento del procedimiento.

Se tienen en cuenta variables de estado de tipo clínico y fisiológico. Las primeras son aquellas que se pueden medir directa y objetivamente sobre el paciente y cuya evaluación se realiza normalmente en una intervención, mientras que las segundas no se toman explícitamente en cuenta durante la intervención debido a su dificultad para ser medidas, pero se calculan mediante un modelo matemático previamente definido por el experto.

Estrategia Educativa Utilizada

El sistema es básicamente un simulador. Por este motivo está definido mediante una serie de estados en los cuales puede estar el paciente en un momento dado.

Es decisión del médico experto determinar las variables tanto clínicas como fisiológicas que le interesa tener en cuenta en un caso, seguramente con el propósito de hacer énfasis sobre estas, dejando de lado las que en dicho caso no tienen tanta importancia académica.

Se trata de simular los cambios que se producen sobre las variables de estado del paciente durante un procedimiento quirúrgico determinado, causados por :

- Efectos de la Cirugía.
- Efectos de cambios que haga el usuario en cuanto a la aplicación de anestésicos y oxígeno.
- Efectos producidos por las drogas que le sean administradas.
- Efectos producidos por los líquidos que le sean aplicados.

En un simulador, como su nombre lo indica, se espera que el comportamiento de aquello que se simula esté reflejado por el funcionamiento del sistema.

El experto (en este caso el médico anestesiólogo), que conoce muy bien la naturaleza del objeto de la simulación (el cuerpo humano durante la anestesia) y las leyes que rigen su funcionamiento prepara el conocimiento básico. Esto incluye la caracterización de las reglas de funcionamiento, y de las variables, los líquidos, drogas y anestésicos que se van a permitir durante la intervención. Pero él no determina la prescripción de una forma única para atacar el problema; tal cosa queda a voluntad del usuario estudiante.

- 766 -

Educativamente se busca que quien interactue con el simulador pueda aprender del sistema, sin las limitaciones o peligros que la vida real pueda tener. El sistema permite al usuario experimentar para aprender.

Cuando el estudiante aprende una serie de conocimientos en sus clases teóricas se encuentra en un ambiente de estudio en el cual se razona de las causas a las consecuencias, es decir, se estudia un diagnóstico indicando cuales son sus síntomas asociados. Por el contrario en el ambiente de trabajo y en la práctica a partir de los efectos (síntomas) se deben descubrir las causas (diagnósticos).

Los sistemas de modelaje y simulación en medicina son muy importantes desde el punto de vista educativo puesto que permiten al estudiante ejercitarse en el tipo de razonamiento que deberá utilizar en la práctica y al cual no está acostumbrado: deducir un diagnóstico a partir de los síntomas en vez de tomar un diagnóstico y describir sus síntomas asociados.

El aprendizaje se realiza por descubrimiento porque al introducir cambios el usuario observa sus efectos pero no se le evalúa. El usuario aprende de su interacción con el sistema.

El sistema será un complemento a las clases, al aprendizaje teórico y a las prácticas en el suministro de anestesia. Le servirá para llevar a cabo una práctica sin riesgo dando prioridad a lo que debe aprender en un caso específico.

Descripción General

El sistema MECCA es un modelo mixto que usa técnicas de modelos de control y técnicas de sistemas expertos.

Se implementaron 2 modelos farmacocinéticos: el inhalado y el intravenoso; basados en modelos matemáticos previamente definidos.

El modelo farmacocinético inhalado genera variaciones en la profundidad anestésica del paciente, la cual a su vez produce efectos directos sobre el estado del paciente, es decir, sobre las variables.

De manera similar el modelo farmacocinético intravenosos se basa en el cálculo de la concentración plasmática de la droga en el organismo. Dicha concentración afecta también el estado del paciente.

Estos dos modelos por sí solos son estáticos, por lo cual se requiere la presencia de un modelo farmacocinético que refleje los cambios (sobre las variables de estado del paciente) producidos por estos modelos y adicionalmente los cambios de las variables que afectan otras variables. Este modelo farmacodinámico no es un modelo de control sino que está basado en técnicas de sistemas expertos. Es decir, se tiene una base de conocimiento expresado mediante reglas de producción de las siguientes maneras :

- SI <causa> ENTONCES <efecto>
- HAGA QUE <efecto>

En la primera para que el efecto se lleve a cabo es necesario que se presente la causa, mientras que en la segunda forma el efecto se produce incondicionalmente.

Puesto que paralelamente a la anestesia se desarrolla la cirugía, ésta también debe ser simulada.

La cirugía esta definida como un conjunto de etapas y transiciones de una etapa a otra, ya sea por el transcurso del tiempo o por la ocurrencia de un evento especial. Cada etapa tiene asociada una transición por tiempo y posiblemente transiciones por eventos.

Durante cada ciclo de ejecución del programa se chequea la transición a otra etapa; es decir se verifica si puede ocurrir una transición por un evento especial, si este no ocurre se verifica si por tiempo la etapa ha concluido.

Con el fin de generar un evento, la cirugía tiene asociada una probabilidad de que ocurran problemas durante su ejecución (se calcula aleatoriamente). A su vez las transiciones por evento tienen asociada una probabilidad de ocurrencia.

El procedimiento es el siguiente :

Si la etapa actual tiene asociadas transiciones por eventos se genera aleatoriamente una probabilidad de problemas para el ciclo si dicha probabilidad es menor que la probabilidad de que se generen problemas durante la cirugía se busca generar un problema en la etapa actual. Por este motivo se suman las probabilidades asociadas a las transiciones por evento de la etapa actual y se genera una probabilidad entre cero (0) y dicha sumatoria; en este momento se comienza a recorrer la lista de transiciones llevando un acumulado de las probabilidades, si dicho acumulado es mayor que la probabilidad generada aleatoriamente se escoge esa transición por evento, de lo contrario se continua con la siguiente transición.

El sistema MECCA consta de cuatro programas que son necesarios para su funcionamiento.

Estos son :

1. El Editor de Tablas.
2. El Editor del Grafo de Cirugía.
3. El Editor de Reglas.
4. El Simulador.

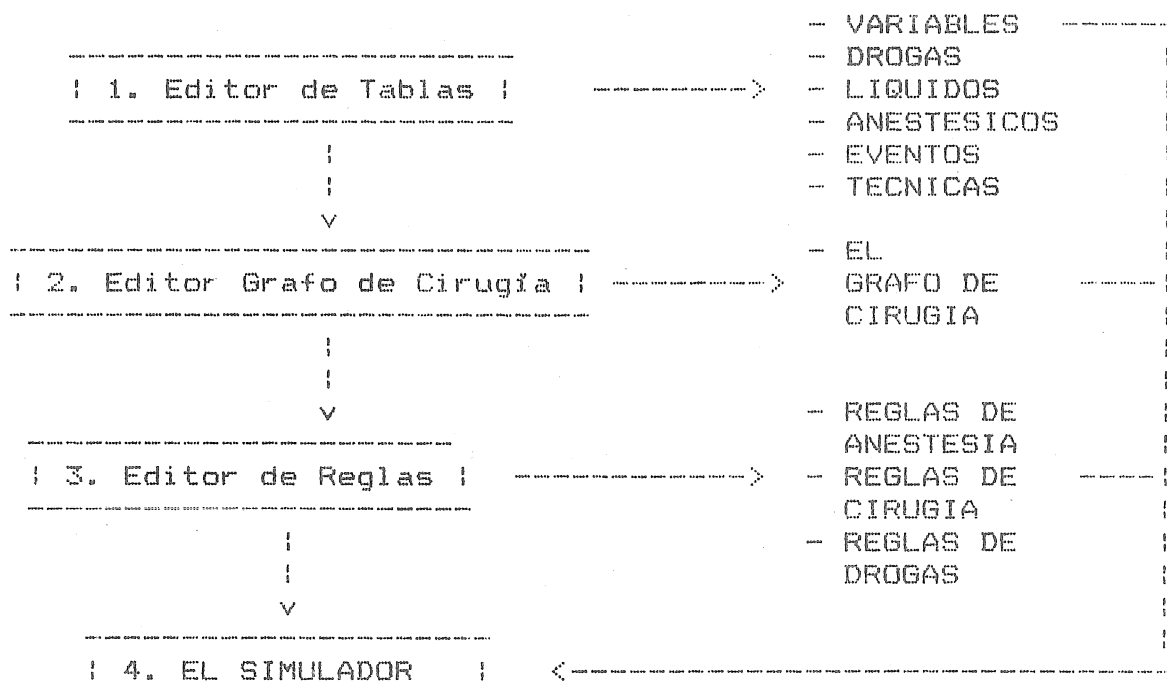
Inicialmente el usuario experto debe definir el conocimiento que se va a manejar. Para este fin utiliza los editores; comienza con el editor de tablas, el grafo de cirugía y finalmente edita las reglas que van a manejar al sistema (reglas de anestesia, reglas de cirugía y reglas relacionadas con la aplicación de una droga).

El usuario experto debe definir con la ayuda del ingeniero del conocimiento los Métodos; estos son procedimientos programados que representan una gran dificultad para ser expresados mediante reglas debido a la complejidad de los cálculos que requieren. Se emplean generalmente para el cálculo de las variables fisiológicas. A pesar de ser estos procedimientos programados se busca definirlos de una manera clara y concisa que no represente problemas al usuario experto. Sin embargo se debe avisar al sistema MECCA la existencia de dichos métodos en el editor de Tablas, para que este los pueda manejar .

El siguiente diagrama muestra los programas que componen el sistema y su interacción con la base del conocimiento:

EL PROGRAMA

BASE DEL CONOCIMIENTO



El Editor de Tablas, El editor del Grafo de Cirugía, El Editor de Reglas son herramientas que permiten al usuario experto definir el conocimiento que se va a tomar en cuenta, generando la Base del Conocimiento. (Ver Diagrama).

El Editor de Tablas

Permite al usuario experto definir los elementos con los cuales va a trabajar el sistema relacionados con el paciente mismo y con el tratamiento que se le puede aplicar.

El Estado del Paciente está definido en un momento dado de la intervención por los valores que toman las variables. Tanto los hechos iniciales acerca del paciente como el conjunto de variables clínicas y fisiológicas que lo describen son definidas mediante este editor.

El Editor de Tablas captura la información acerca de :

- Las Variables Clínicas y Fisiológicas.
- Los hechos iniciales del paciente.
- Las Drogas.
- Los Líquidos.
- Los Gases (Anestésicos y Oxígeno).
- Los Métodos que van a ser utilizados y las variables que estos afectan.
- Eventos Especiales y Técnicas Elementales.

Para mayor información a este respecto consultar la sección 3.

Una vez que se tienen las variables, se puede definir el paciente hipotético dándole valores iniciales a éstas.

Editor del Grafo de Cirugía

Permite al usuario experto definir una cirugía cualquiera.

La cirugía se define para efectos del sistema como un grafo cuyos estados corresponden a nodos del grafo y cuyas transiciones ya sea por tiempo o por causa de un evento especial ocurrido corresponden a los arcos.

Depende de la definición de los eventos especiales puesto que la transición de un estado a otro del grafo puede ser causada por un evento especial que ocurra durante la cirugía.

Genera un archivo donde está el grafo de cirugía con las características ya descritas.

Editor de Reglas

Mediante el editor de reglas el experto puede definir las leyes que rigen el sistema tanto para anestesia y drogas que se aplican como para la misma cirugía.

La importancia de las reglas radica en que estas contienen todo el conocimiento del experto anesthesiologo y del médico relacionado con la cirugía, para que ocurran los cambios en el estado del paciente, es decir, para que la "Simulación" pueda ser efectuada. Es decir las reglas dan "movilidad" al sistema.

El Simulador

Una vez que el experto ha definido todo el conocimiento que se va a tomar en cuenta, el simulador puede funcionar.

Las facilidades que ofrece el programa al usuario pueden resumirse de la siguiente manera:

Inicialmente se pregunta al usuario cuál cirugía desea practicar.

Puesto que el manejo del tiempo durante la anestesia es de gran importancia, se permite al usuario determinar el intervalo de tiempo en el cual desea monitorear las variables y todo lo que sucede en la cirugía, es decir, cuánto tiempo transcurre para que los cambios sean actualizados. Es importante aclarar que esto no tiene relación alguna con la rapidez con la que los cambios ocurren.

Dicho intervalo permite contraer o dilatar el tiempo, de acuerdo con el deseo del usuario. Es decir el tiempo es "regulable".

La importancia de llevar un control del tiempo, desde el punto de vista del usuario radica en que se deben tomar decisiones constantemente y el no tomar ninguna decisión es una de las acciones posibles, puesto que esto afecta el estado del paciente. El tiempo es muy importante durante la intervención.

El sistema permite también al usuario llevar un registro de los cambios ocurridos durante la intervención. Esta facilidad es de gran importancia académica puesto que permite saber y entender al usuario el porqué de una reacción del paciente ante determinada circunstancia, ya que permite consultar la regla que determinó dicha reacción y a su vez devolverse en el tiempo consultando los cambios de los valores y las reglas que los produjeron.

Adicionalmente este registro ha contribuido notoriamente a refinar y verificar la validez del conocimiento introducido, puesto que permite ver al usuario experto las variaciones producidas por las reglas definidas.

La idea general del funcionamiento del sistema es la siguiente:

Una vez que se ha pedido toda la información pertinente se inicia la intervención.

Se presentan al usuario en pantalla las variables que el experto definió y consideró pertinente que se mostraran

constantemente. Se actualizan las variaciones de dichas variables cada vez que se cumple el intervalo de tiempo definido por el usuario al principio de la intervención.

Puesto que el programa está desarrollado con base en lo que ocurre en una sala de cirugía de un hospital colombiano, se ha buscado que la simulación sea aproximada a la realidad, sin embargo se permite medir variables que en este medio no se pueden medir puesto que no existen las herramientas necesarias.

Cuando se inicia la anestesia en la sala de cirugía el paciente es anestesiado con anestésico inhalado mediante la máquina de anestesia (la cual contiene óxido nitroso y oxígeno) y/o con anestésicos intravenosos. También se le aplican otras drogas que contribuyan al bienestar. Una vez que el paciente ha sido anestesiado, puede ser intubado con el fin de suministrarle oxígeno.

Posteriormente, el anestesiólogo puede dar la orden de iniciar la cirugía. Se inicia entonces el mantenimiento. A partir de este momento se siguen aplicando drogas y anestésicos y se comienza a vigilar al paciente mediante la medición de algunas variables de interés y la realización de exámenes que permitan determinar el estado general del paciente y la profundidad anestésica de éste.

Constantemente el anestesiólogo ayuda al paciente a respirar mediante una bomba, es decir le ayuda con la ventilación. También puede suministrarle líquidos determinando cuantas gotas de líquido se suministran en un minuto.

De acuerdo con esto el sistema MECCA, permite realizar las siguientes opciones :

- aplicación de una droga
- aplicación de un anestésico u oxígeno
- aplicación de un líquido
- ayuda en la ventilación
- técnicas elementales

El usuario puede consultar las variables fisiológicas y clínicas, los hechos y el Registro de cambios.

El médico anestesiólogo tiene la capacidad de controlar también un poco la cirugía porque es quién da la orden de iniciarla (tal como ocurre en una sala de cirugía), de pararla o reanudarla cuando estime conveniente. El usuario con solo presionar una tecla puede llevar a cabo alguna de las opciones anteriores, el sistema nunca le obligará a tomar una acción, es decir, no se le presenta un menu de opciones sino que el decide tomar una acción. No hacer nada significa también tomar una decisión, puesto que esto puede afectar el estado del paciente.

Después de haberse iniciado la cirugía comienza ésta a desarrollarse paralelamente con la anestesia. Se simulan las transiciones de un estado a otro y la ocurrencia de un evento especial de acuerdo con una probabilidad. - 772 -

La cirugía y la anestesia no se pueden separar puesto que están íntimamente ligadas con el paciente, es decir, lo que ocurre en la cirugía depende en parte del estado del paciente y lo que ocurre en la anestesia (las decisiones de anestesia) afectan naturalmente el estado del paciente. Pero las decisiones de anestesia son responsabilidad del usuario anestesiólogo, mientras que lo que ocurre en la cirugía es controlado por el sistema.

Finalmente, la intervención termina cuando la cirugía ha concluido y el anestesiólogo decide terminar el mantenimiento y los cuidados de la postcirugía.

Conclusiones

En la implementación del sistema educativo de simulación de pacientes durante la anestesia MECCA utilizamos tanto Técnicas de Control como de Sistemas Expertos.

Las técnicas de control se utilizaron en la implementación de los modelos farmacocinéticos, puesto que estos están basados en procedimientos matemáticos previamente definidos y validados. Se utilizan técnicas de sistemas expertos para implementar el modelo fisiológico del paciente y para la evolución de la simulación; es decir, el sistema experto permite el desarrollo de la intervención puesto que genera los cambios en las variables del paciente y el avance de la cirugía.

Los sistemas expertos tienen la ventaja de que el conocimiento está separado del programa; lo cual facilita al usuario experto las labores de validación y complementación del conocimiento. Esta característica es de gran importancia en el conocimiento médico ya que este es incompleto y no se puede asegurar su certeza porque está cambiando constantemente. Modelar el funcionamiento del cuerpo humano no es una tarea sencilla y menos aún cuando éste se considera bajo una situación especial como es la anestesia.

Los sistemas de control permiten desarrollar modelos matemáticos bastante precisos y fáciles de manejar; sin embargo la programación de dichos modelos puede resultar engorrosa para el experto y rígida para permitir modificaciones en el conocimiento. Los sistemas de control requieren de un proceso de validación bastante complejo, puesto que requieren la representación del conocimiento mediante modelos matemáticos que pueden resultar difíciles de manejar. Por otra parte, los sistemas expertos permiten al experto expresar el conocimiento manera muy cercana a la forma como él razona, sin recurrir a modelos matemáticos que pueden resultar inadecuados y difíciles de manejar.

Las técnicas de sistemas de control resultaron muy adecuadas para la implementación de los modelos matemáticos validados como son el modelo de drogas inhaladas de W.W. Mapleson y el modelo farmacocinético bicompartimental publicado por M. Wood. Por otro lado, mediante el uso de las técnicas de sistemas expertos se logró permitir libertad al usuario para expresar el conocimiento de la manera como el experto estime conveniente.

Teniendo en cuenta estas observaciones, concluimos que el uso de sistemas expertos para la construcción de herramientas computacionales en el área de la medicina puede resultar muy conveniente. Esto es especialmente cierto por la característica modular que tienen los sistemas expertos, al

separar los "datos" (conocimiento de tipo médico) del control⁷⁴ - (programa) se independiza el sistema del tipo de conocimiento que utiliza.

La labor de obtención del conocimiento médico ha resultado muy difícil dada la naturaleza de este. Como indicábamos antes, el funcionamiento del cuerpo humano es muy complejo, esto hace que exista una vasta cantidad de conocimiento acerca de éste. Intentar recopilar una parte significativa del conocimiento existente sobre el comportamiento del cuerpo bajo la acción de diversos medicamentos y de una cirugía es una tarea que puede tomar mucho tiempo.

El diseño e implementación del simulador represento una tarea larga y un tanto compleja por la naturaleza del conocimiento; se pretendió desarrollar una herramienta que simulara los cambios de estado de un paciente por la aplicación de la anestesia durante el desarrollo de una cirugía.

Este programa se desarrolló con fines educativos, lo cual imprime al sistema unas características especiales, puesto que además de la simulación se implementaron unas herramientas que facilitan al usuario su proceso de aprendizaje. Desde el punto de vista educativo, el simulador tiene la ventaja de permitir al estudiante practicar sus conocimientos evitando los peligros que puedan presentarse en la vida real. El estudiante puede experimentar para aprender.

La esencia educativa del sistema MECCA no solamente se ve reflejada en el simulador, sino que también mediante el Registro de Cambios permite al estudiante formalizar los conceptos, puesto que da respuesta al porqué de una reacción del paciente ante determinada circunstancia.

Aunque no esté completamente validado el conocimiento, el sistema tiene una característica educativa muy importante al permitir al estudiante observar relaciones de causalidad entre variables; es decir, aunque en su estado actual los valores de las variables del paciente durante la simulación pueden no ser muy reales, se pueden observar claras relaciones entre ellas, elemento muy importante desde el punto de vista educativo.

Dado el objetivo del sistema y la estructura de este, el sistema MECCA puede estar sujeto a mejoras desde varios puntos de vista :

- desde el punto de vista técnico
- desde el punto de vista médico
- desde el punto de vista educativo

Desde el punto de vista técnico podría decirse que el sistema

está "completo" puesto que la estructura que está implementada permite dar soporte al tipo de conocimiento que se maneja y que ha sido considerado en el diseño. Sin embargo, podrían efectuarse mejoras que permitan manejar el conocimiento de una manera más eficaz y que ofrezcan al usuario tanto experto como estudiante mayores facilidades para el manejo del sistema.

Para hacer más eficaz el manejo del sistema, se podría pensar en desarrollar un generador automático de tablas que permita manejar las estructuras básicas de una manera más uniforme. Este generador de tablas permitiría al usuario definir cuantos objetos de conocimiento diferentes desee, para así ampliar el tipo de conceptos que se manejan sin tener que entrar en labores de programación.

En cuanto al tipo de reglas que maneja el sistema, podría pensarse en ampliar el tipo de operaciones que soporta para incluir entre sus condiciones el operador lógico OR y permitir funciones como Logaritmo.

Actualmente el sistema, ofrece un solo nivel de simulación en el cual el usuario tiene acceso a todas las variables definidas y el tiempo no transcurre durante las consultas y acciones del anestesiólogo. Con el fin de hacer el sistema más real puede plantearse al usuario la dos niveles de dificultad: el primero de ellos con las características que actualmente están implementadas y el segundo impediría al usuario estudiante la consulta de variables que en la realidad no pueden ser medidas debido a que no se cuenta con las herramientas necesarias. En este último nivel se buscaría hacer la simulación en tiempo real con el fin de que el médico pueda realizar la intervención en una ambiente más real en el cual el tiempo es de gran importancia, puesto que la demora en la toma de una decisión puede influir en el estado del paciente.

Desde el punto de vista médico hay una gran cantidad de mejoras que se pueden realizar, pero se debe tener en cuenta que el conocimiento involucrado es siempre susceptible de ser modificado y complementado. El conocimiento que se ha considerado hasta ahora no ha culminado aún su proceso de validación, puesto que las reglas no están completas.

Hay varios aspectos del conocimiento que pueden ser mejorados para lograr un mejor funcionamiento del sistema en sus múltiples interacciones, estas mejoras se refieren fundamentalmente al área de control y son :

- El modelo farmacocinético de las drogas no inhaladas, pues actualmente solamente funciona con la administración de drogas por vía intravenosa, suponiendo una absorción completa e instantánea. Ocasionalmente se administran drogas por otras vías en donde la absorción es lenta e incompleta, o por vía

venosa en infusión donde la absorción es completa pero toma mucho más tiempo.

- El manejo de los datos hemodinámicos se hace de una manera relativamente sencilla, y podría desarrollarse un modelo más complejo y por lo tanto más aproximado a la realidad; que tenga en cuenta otras variables hemodinámicas que actualmente no están contempladas en el sistema, como por ejemplo: presión venosa central, resistencias vasculares, contractilidad cardíaca, etc..

Además, sería conveniente que el sistema simule los datos del electrocardiograma (actividad eléctrica del corazón), vigilancia que se realiza normalmente durante la anestesia.

- El modelo de control de la respiración y del PaCO₂ también podría mejorarse para que tenga en cuenta cosas tales como producción de CO₂, es decir, cambios metabólicos que podrían ocurrir en el paciente.

- Por último se puede incluir información acerca de entidades poco comunes que generan alteraciones fisiopatológicas especiales y que requieren un tratamiento diferente por parte del anestesiólogo, es decir, se podrían plantear casos de pacientes con otras complicaciones adicionales al motivo de la cirugía.

Desde el punto de vista educativo, una ampliación muy importante que se podría pensar en desarrollar sería incluir al sistema un módulo que se encargara de hacer comentarios acerca del desempeño del usuario durante la administración de la anestesia. De esta manera, al recibir "retroinformación" del sistema, el usuario podría eventualmente revisar sus conocimientos en aquellas áreas en que esto sea necesario.

También se puede pensar en utilizar el conocimiento en el cual está basado el sistema para realizar otro tipo de sistemas educativos, como por ejemplo un sistema que apoye al usuario en la elaboración de planes anestésicos.

Teniendo en cuenta todos estos elementos, se puede deducir que el Sistema MECCA no está concluido y que posiblemente siempre pueda verse sujeto a modificaciones debido a la naturaleza de sus objetivos y al tipo de conocimiento que maneja, ya que en medicina no se tiene la verdad absoluta.

Aunque no esté completo, consideramos que el sistema cuenta con una base de conocimiento adecuada y, después de una labor de refinamiento y obtención de más conocimiento se puede pensar en su utilización en algún hospital.