

MODELO DEL PROCEDIMIENTO DE ADAPTACIÓN DE NEONATAL INMEDIATA: UNA APLICACIÓN DE SISTEMAS DE EVENTOS DISCRETOS EN NEONATOLOGÍA

EDGAR H. SEPULVEDA*, LEONARDO E. BERMEO*, LUIS C. MENDEZ*

**Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*

***Escuela de Perinatología y Neonatología
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*

Emails: ehsepulvedao@unal.edu.co, lbermeoc@unal.edu.co, lcmendezc@unal.edu.co

Abstract— Modeling and simulation are becoming increasingly important tools for teaching and researching in medicine. Medical guidelines are systematically developed statements to assist practitioners to determine appropriate health care in specific circumstances. A medical guideline or protocol can be represented, in an abstract way, as a discrete event system model. This is indeed a promising field for applying this kind of models. In this paper, we present a finite automaton model for the Neonatal Adaptation Guideline developed by the School of Pediatrics and Neonatology of the National University of Colombia. The reported model extends the original flow chart containing the guideline, in terms of understanding, consistence and level of detail.

Keywords— Discrete event system modeling, Neonatology, Statechart, Deterministic Finite Automaton, Medical guideline or protocol.

Resumen— El modelamiento y la simulación son de importancia creciente en la enseñanza y la investigación en Medicina. Las guías y protocolos médicos son declaraciones desarrolladas consensuadas y sistemáticamente para apoyar a los profesionales de la salud sobre como proceder en circunstancias específicas. En forma abstracta, una guía o un protocolo médico puede representarse como un modelo de eventos discretos, siendo este un campo de aplicación prometedor de este tipo de modelos. En este artículo presentamos un modelo de autómatas finito para el *Procedimiento de Adaptación Neonatal Inmediata* desarrollado por la Escuela de Perinatología y Neonatología de la Universidad Nacional de Colombia. El modelo desarrollado en este trabajo amplía el flujograma original del procedimiento en términos de comprensión, consistencia y nivel de detalle.

Palabras clave— Modelamiento de sistema de eventos discretos, Neonatología, *Statecharts*, Autómata finito determinista, Guía o protocolo médico.

1. Introducción

El modelamiento y la consecuente simulación computacional son herramientas cada vez más relevantes en la enseñanza y la investigación en medicina.

El desarrollo de modelos en medicina con base en sistemas de eventos discretos (SED) es un área activa como lo muestran los algunos trabajos representativos que mencionamos a continuación: el trabajo de Emerson et al. (2013) utiliza el modelamiento de eventos discretos para el entrenamiento médico en la atención terciaria urbana, reduciendo el tiempo de espera de los pacientes; el trabajo de Beate et al. (2010) evalúa las ventajas de modelos de SEDs para integrar líneas de espera y colas para tratamientos sin demoras y disponibilidad de todos los recursos necesarios en todo momento; el trabajo de Grigorov y Rudie (2011) usa control supervisorio de SEDs para el modelamiento y simulación de políticas para el control de epidemias.

Un campo prometedor de aplicación de los sistemas de eventos discretos modelamiento de guías y protocolos médicos (Méry y Singh, 2012). Las guías y protocolos médicos son declaraciones desarrolladas sistemática y consensuadamente para apoyar a los profesionales de la salud sobre como proceder en circunstancias específicas (ten Teije et al., 2006). Existen antecedentes importantes

del uso de SEDs para el modelamiento de guías médicas: en el trabajo de Rosalie (2006) se usan autómatas finitos temporizados y no temporizados para representar diferentes escenarios médicos neonatales con base en información extraída del protocolo de Resucitación Neonatal Inmediata de *American Heart Association* (AHA) (Chair et al., 2015). Los trabajos de Guo et al. (2016) y Méry y Singh (2012) exploran, respectivamente, el uso de *Statecharts* y del lenguaje EVENT B para el modelamiento y verificación formal de protocolos médicos.

El uso de métodos técnicos formales de modelamiento de protocolos médicos tiene dos propósitos fundamentales: (i) Mejorar la estructura de los mismos en términos de *consistencia*, *reducción de ambigüedad y completitud* (ten Teije et al., 2006); y, (ii) Desarrollar herramientas de simulación computacional para que los practicantes puedan aprender y entrenarse con los protocolos médicos. Si bien la experiencia clínica es una metodología de aprendizaje irremplazable en medicina, los avances tecnológicos actuales permiten utilizar herramientas de simulación para complementar el entrenamiento del personal de la salud.

En relación a la importancia de la simulación como método de enseñanza en medicina, la figura 1 revela un crecimiento exponencial por año en

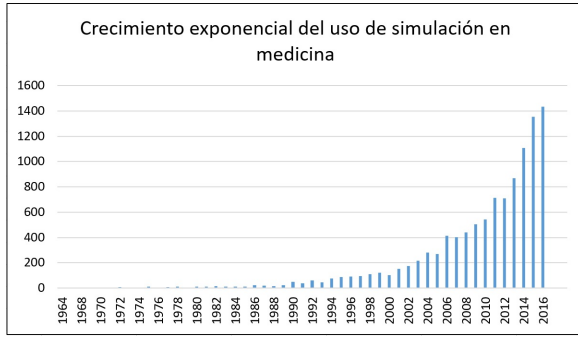


Figura 1: Crecimiento exponencial del uso de simulación en medicina neonatal

el número de publicaciones. El resultado presentado en la la figura 1 fue obtenido buscando artículos de que usan simulación en educación, enseñanza o aprendizaje en medicina. La búsqueda fue realizada en la base de datos PubMed bajo la siguiente ecuación de búsqueda: (simulation and (medical (teaching or education or learning))).

Dada la importancia creciente de la simulación como herramienta pedagógica y de investigación en medicina, el trabajo que estamos reportando en este artículo hace parte de un proyecto para desarrollar de una herramienta de simulación para estudiar diferentes prácticas de interés en neonatología. El diagrama funcional de esta herramienta está representado en la figura 2.

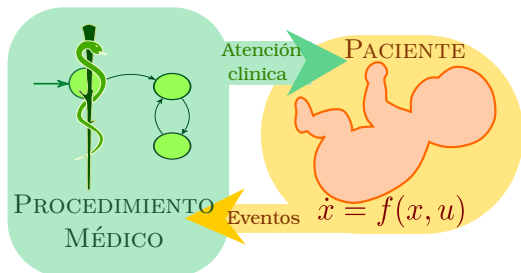


Figura 2: Investigación sobre fisiopatología del paciente y la práctica clínica

Desde una perspectiva general, un modelo computacional para estudiar procedimientos médicos debe considerar separadamente *al paciente* y *al procedimiento médico*. Existen avances considerable en el modelamiento de los procesos fisiológicos de un paciente usando modelos dinámicos de ecuaciones diferenciales (vea, por ejemplo, Myers y Capper (2002) y Albanese et al. (2016)). Para tener una representación computacional completa de la interacción del paciente y el proceso médico, es necesario desarrollar un modelo de simulación para los *protocolos médicos* (bloque verde de la figura 2). Puesto que los pasos de atención clínica que deben realizarse a un paciente se definen por los signos o síntomas que presenta, es natural abstraer un protocolo médico como un sistema de eventos discretos.

En este trabajo es presentamos el modelo, como sistema de eventos discretos, del procedimiento de Adaptación Neonatal Inmediata (ANI), desarrollado durante muchos años de práctica clínica por la Escuela de Perinatología y Neonatología de la Universidad Nacional de Colombia (EPN-UNC) y publicado en el 2004 (Currea, 2004). La elección correcta del momento del pinzamiento del cordón umbilical y las prácticas clínicas adecuadas de adaptación neonatal pueden beneficiar a cerca 700,000 colombianos que nacen cada año.

Con la motivación precedente, presentamos este artículo, estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 presentamos los flujogramas de representación de protocolos médicos, su modelamiento como autómatas finitos y también introducimos las características de los *Statecharts* necesarias en este trabajo. En la sección 3 discutimos el flujograma del procedimiento de adaptación neonatal inmediata y presentamos su modelo como sistema de eventos discretos. En la sección 4 presentamos opiniones de realimentación recibidas de diferentes profesionales. Finalmente, en la sección 5 presentamos las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

2. Preliminares

Con el fin de brindar al lector los principales elementos que fundamentan este trabajo, a continuación vamos a revisar los siguientes temas: (i) Flujogramas de procedimientos médicos; (ii) Autómatas finitos y su aplicación en medicina; y, (iii) *Statecharts*.

2.1. Flujogramas de protocolos médicos

Una forma usual de presentar secuencialmente un protocolo médico es a través de un *flujograma*. Esta es una forma de representación visual que sintetiza la información del protocolo, a manera de algoritmo (vea algunos ejemplos de flujogramas, usados en diferentes contextos médicos, en Keltia et al. (2018), Caicedo-Cuenca (2017) y Mencarini et al. (2016)). A continuación presentamos un flujograma muy sencillo para ilustrar el proceso de modelamiento de flujogramas.

Ejemplo 1 *El flujograma de la figura 3 es un protocolo para definir el riesgo por posible estado de gestación para un examen de medicina nuclear diagnóstica (James y Warren-Forward, 2015).*

Es importante resaltar que el flujograma de la figura 3 es el resultado del consenso, obtenido sistemáticamente, entre varios médicos. En general, la obtención de estos flujogramas es un proceso iterativo realizado por profesionales de la salud, que necesita varios ciclos de revisión y consenso, antes de convertirse en un protocolo.

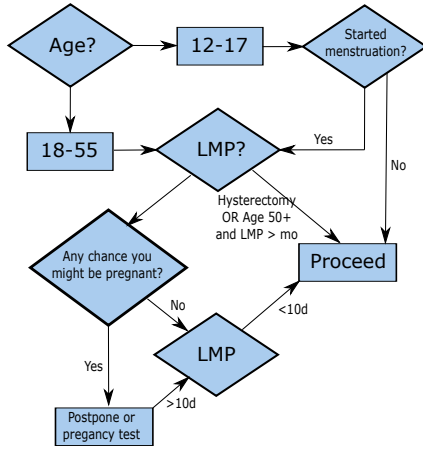


Figura 3: Flujograma de evaluación de riesgo de pacientes con posible gestación para un examen de medicina nuclear diagnóstica. La abreviatura en inglés LMP significa último periodo menstrual (*Last Menstrual Period*).

La selección de una herramienta formal de modelamiento de protocolos médicos debe considerar cuidadosamente los siguientes aspectos:

- **Versatilidad:** posibilidad de ser usada para modelar diferentes guías y protocolos médicos de manera eficaz y comprensible
- **Escalabilidad:** Los modelos realizados pueden ser modificados fácilmente, aumentando progresivamente los detalles de un procedimiento médico.
- **Complejidad moderada:** La representación visual del modelo debe ser lo suficientemente clara para ser interpretada fácilmente por personal de la salud, de ingeniería o de otras profesiones interesadas en su uso del modelo. Esto permite acelerar los procesos de desarrollo interdisciplinario.

Teniendo las características anteriores decidimos usar autómatas finitos y *Statecharts* como herramientas de modelamiento. A continuación expondremos la relación existente entre flujogramas y autómatas finitos y las definiciones más importantes usadas en este trabajo.

2.2. Autómatas finitos deterministas y su aplicación en medicina.

Formalmente, un autómata finito determinista, denotado por G , es un modelo matemático representado por la séxtupla:

$$G = (Q, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m),$$

en la cual Q es el conjunto de estados, Σ es el conjunto de eventos, $f : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ es la función de transición de estado, $\Gamma : Q \rightarrow 2^\Sigma$ es la función de eventos activos, $x_0 \in Q$ es el estado inicial

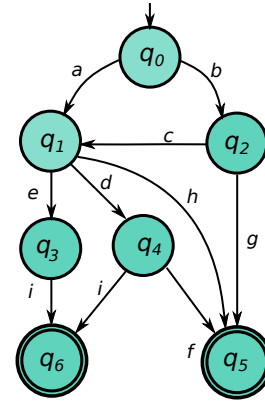


Figura 4: Autómata que describe el flujograma del de la figura 3

y $X_m \subseteq X$ es el conjunto de estados marcados. El siguiente ejemplo ilustra la relación entre un flujograma y un autómata.

Ejemplo 2 La figura 4 muestra un autómata que representa el flujograma médico presentado en la figura 3. El estado inicial de este autómata es q_0 (rotulo que significa el inicio del test de riesgo, de acuerdo con la tabla 1a). Los estados marcados

Tabla 1: Estados y eventos del autómata de la figura 4

(a) Estados del automata	
Definición	
q_0	Inicio del test
q_1	Ciclo menstrual establecido
q_2	Ciclo menstrual incierto
q_3	Gestación probable
q_4	Gestación improbable
q_5	Se realiza el procedimiento
q_6	Se pospone el procedimiento

(b) Eventos del autómata	
a	18 <Edad <55 años
b	12 <Edad <17 años
c	Presenta menstruación
d	La paciente descarta posible gestación
e	La paciente NO descarta posible gestación
f	Último periodo menstrual (LMP) <10 días
g	NO presenta menstruación
h	Histerectomía ó Edad >50 años ó último periodo menstrual >12 meses
i	Último periodo menstrual (LMP) >10 días

son q_5 (rótulo que significa que se realiza el procedimiento) y q_6 (rótulo que significa que se pospone el procedimiento). El conjunto de eventos es $\Sigma = \{a, b, c, d, e, f, g, h, i\}$ (rótulos que expresan las transiciones entre los estados, de acuerdo con la tabla 1b). Por ejemplo, el evento a significa que la mujer ha sido clasificada en un rango de edad entre los 18 y 55 años. La función de transición

expresa los cambios de estado del autómata, de acuerdo con el procedimiento. Por ejemplo, en términos de autómatas decimos: $f(q_1, d) = q_4$. Traducido a términos médicos esto significa de acuerdo al rango de edad (estado q_1) y dadas las condiciones informadas por el paciente (evento d) se diagnostica un posible estado de gestación (estado q_4). Todos los significados médicos que corresponden a estos rótulos de los estados y eventos están contenidos en la tabla 1.

Un modelo de un procedimiento médico debe mantener una complejidad visual moderada para, así, facilitar su subsecuente verificación y refinamiento por parte de un equipo interdisciplinario. Esto nos lleva al uso de la representación de *Statecharts*, descrita brevemente a continuación.

2.3. Statecharts

El formalismo denominado *Statecharts*, propuesto por Harel (1987), define una representación visual jerárquica de autómatas finitos. Dentro de este formalismo nos interesa usar dos elementos fundamentales: superestados y transiciones condicionadas. Estos elementos serán explicados a continuación.

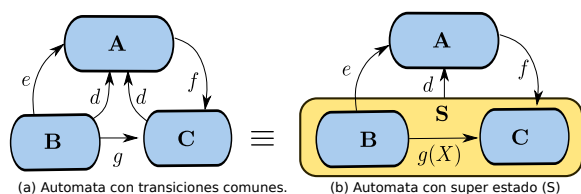


Figura 5: Ejemplo autómata con transición condicionada y super estados de los Statecharts

► **Superestado.** Consideremos el autómata de la figura 5(a). En este autómata, la ocurrencia del evento d desde uno de los estados B ó C implica la transición al estado A . Esto se puede representar agrupando los estados B y C dentro de un superestado, denotado por S , tal como se ilustra en la figura 5(b). De esta forma, las dos transiciones que van de B a A y de C a C , respectivamente, se representan por una única transición rotulada por el evento d , reduciendo, así, la complejidad visual en la representación gráfica de un autómata. La semántica del superestado S se representa por una función O-exclusiva de B y C . Esto quiere decir que si el modelo está en el superestado S debe estar en el estado B ó en el estado C , pero no en ambos. Así, el superestado S es una abstracción de los estados B y C que captura propiedades comunes de los mismos, disminuyendo el número de transiciones representadas visualmente (Harel, 1987).

► **Transición condicionada.** El autómata de la figura 5(b) posee una transición condicionada, representada por $B \xrightarrow{g(X)} C$. De acuerdo al formalismo *Statecharts*, esta transición implica que el autómata pasa del estado B al estado C si y solo si se produce el evento g , mientras se cumple la condición X .

En síntesis, los *Statechart* son un formalismo visual para presentar modelos basados en autómatas finitos, cuya finalidad es representarlos con una menor complejidad visual. Aquí hemos omitido muchos detalles técnicos de autómatas y *Statecharts*, teniendo en cuenta el carácter interdisciplinario de este trabajo.

3. Modelo del procedimiento de Adaptación Neonatal Inmediata

En esta sección presentamos el modelo, como sistema de eventos discretos, del flujograma que representa el procedimiento de Adaptación Neonatal inmediata recomendado por la Escuela de Perinatología y Neonatología de la Universidad Nacional de Colombia (EPN-UNC).

3.1. Flujograma de Adaptación Neonatal Inmediata

La figura 6 representa el flujograma de Adaptación Neonatal Inmediata (Currea, 2004). La fi-

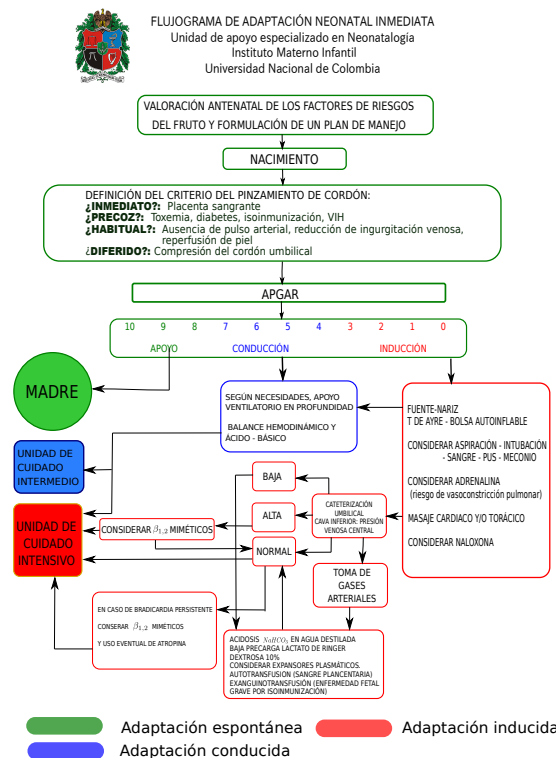


Figura 6: Flujograma de la adaptación neonatal inmediata de la EPN-UNC (Currea, 2004).

nalidad de este flujograma es describir los pro-

cedimientos clínicos de adaptación de un neonato a sus nuevas condiciones vitales. Con este fin, se recomienda el uso de una escala de medición de la vitalidad del neonato llamada escala APGAR (Apgar, 1953) para determinar la evolución del paciente en diferentes momentos del proceso de adaptación neonatal. Así mismo, clasifica diferentes tipos de pinzamiento del cordón umbilical. Para determinar si hay ventilación y definir si está haciéndose con esfuerzo, se utiliza la escala de SILVERMAN-ANDERSEN (Silverman y Andersen, 1956). Según los signos y condiciones fisiológicas del paciente, su proceso de adaptación puede ser *espontáneo, conducido o inducido*. Los bloques en verde de la figura 6 contienen información de la adaptación neonatal espontánea; los bloques en azul, de la adaptación conducida; y, en los bloques en rojo se consigna el proceso de adaptación inducida.

3.2. Modelo de eventos discretos del Procedimiento de Adaptación Neonatal Inmediata

El modelo de eventos discretos que presentamos a continuación contiene información detallada de los procesos de adaptación espontánea y conducida del neonato. En la parte correspondiente a la adaptación inducida se omiten detalles de modelamiento correspondientes a la cateterización, manejo de volúmenes y suministro de medicamentos, debido a que nuestro interés actual se centra en el estudio de las prácticas de pinzamiento del cordón umbilical.

La figura 7 es el modelo de eventos discretos (con descripción matemática de autómata finito y extensión visual de *Statechart*) que sintetiza el resultados de este trabajo. En la tabla 3 está la descripción de los estados del modelo, compuesto en total por 19 estados (rotulados de 0 a 18) y 3 superestados (rotulados como A, B y C). Note que cada estado corresponde con un diagnóstico o con un procedimiento que debe ser realizado al paciente. Por ejemplo, el estado 7 indica que debe practicarse asistencia ventilatoria no invasiva al paciente neonato. La tabla 2 contiene la descripción de los 27 eventos del modelo. Aquí es interesante recalcar que la palabra “evento” del lenguaje de autómatas se asocia con un signo vital, un síntoma, o una característica del paciente que puede ser detectada por el médico, esto es, con un *evento médico*. Para ilustrar esto consideremos, por ejemplo, la transición $6 \xrightarrow{cv_1} 8$, aquí el evento cv_1 indica que el paciente tiene un número de pulsaciones cardíacas por minuto por debajo de 59 (paro cardiovascular relativo) por tanto debe pasar del estado 6 en que se le ha diagnosticado deficiencia respiratoria al estado 8 en que requiere asistencia invasiva y/o masaje cardiovascular.

Los estados marcados sirven para definir momentos definitivos del proceso de Adaptación Neo-

Tabla 2: Eventos del autómata de la figura 7

(a) Riesgo via nacimiento	
Descripción	
r_1	Riesgo aumentado con indicación de nacimiento vía abdominal
r_2	Riesgo habitual o Riesgo aumentado sin indicación de nacimiento vía abdominal
(b) Valoración de vitalidad escala APGAR	
e_3	Evaluación Apgar (8 – 10)
e_2	Evaluación Apgar (4 – 7)
e_1	Evaluación Apgar (0 – 3)
e_0	Evaluación Apgar (0)
(c) Valoración en la Escala Silverman-Andersen	
d_0	No presenta esfuerzo ventilatorio (0 puntos)
d_1	Esfuerzo ventilatorio leve (1-3 puntos)
d_2	Esfuerzo ventilatorio moderado (4-6 puntos)
d_3	Esfuerzo ventilatorio severo (7-10 puntos)
(d) Ventilación	
v_0	Paro ventilatorio – Apnea
v_1	Bradipnea (1 a 29 respiraciones por minuto)
v_2	Taquipnea por líquido en el pulmón
v_3	Taquipnea por prematuro o deficiencia de surfactante
(e) Estado cardiovascular	
cv_0	Paro cardiovascular absoluto (0 latidos por minuto)
cv_1	Paro cardiovascular relativo (0-59 latidos por minuto)
cv_2	Bradicardia (60-99 latidos por minuto)
cvd	Bradicardia y deterioro de la función cardíaca
(f) Valoración temporal de vitalidad y ventilación	
a_1	Valoración Apgar y Silverman-Andersen 1 minuto
a_5	Valoración Apgar y Silverman-Andersen 5 minutos
a_{10}	Valoración Apgar y Silverman-Andersen 10 minutos
(g) Eventos no clasificados	
N	Nació, es feto neonato
pe	Prematuro extremo
f	Examen clínico normal y no presenta esfuerzo ventilatorio
mo	Mortinato
rc	Ruptura del cordón umbilical
dp	Desprendimiento placentar – cordon desingurgitado
P	Cordón umbilical PINZADO
NP	Cordón umbilical NO PINZADO
CP	Ausencia pulso arterial, desingurgitación venosa y perfusión cutánea adecuada
t_{20}	Tiempo >20 minutos
IPP	Indicación de pinzamiento precoz
$VCVE$	Ventilación y cardíaco-vascular estabilizados

natal. Así, los estados 4, 16 y 17 indican el tipo de pinzamiento del cordón umbilical realizado al neonato. Los estados 18 y 19 indican que el proceso de adaptación neonatal ha terminado y que el neonato debe ser trasladado a la unidad de cuidado neonatal (estado 18) o con al alojamiento conjunto con la madre (estado 19). En algunos casos el neonato nace muerto, o no tiene condiciones vitales al nacer para adaptarse, por lo cual debe ser declarado fallecido (estado 12).

Autómata finito para adaptación neonatal inmediata

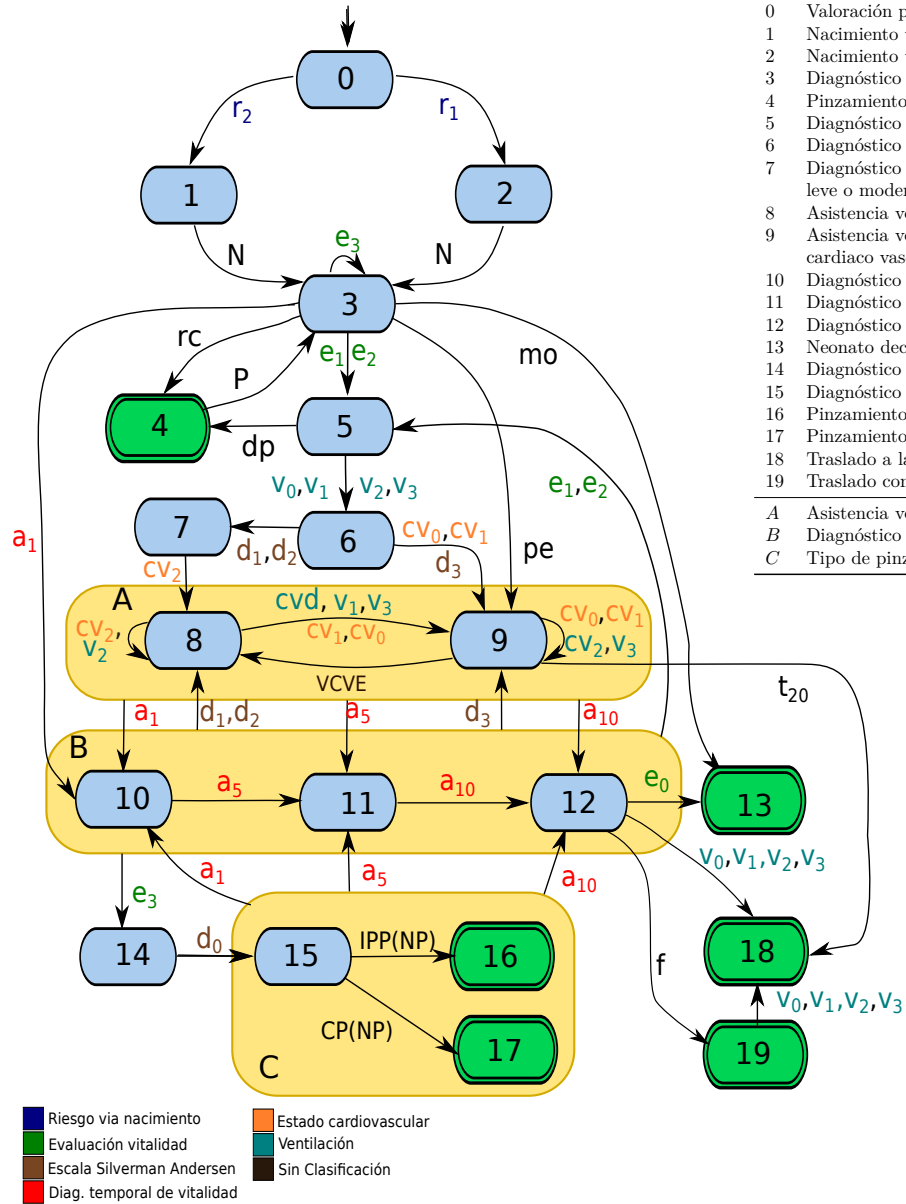


Tabla 3: Estados del autómata de la figura 6

Definición	
0	Valoración prenatal
1	Nacimiento vía genital
2	Nacimiento vía abdominal
3	Diagnóstico de vitalidad – ventilación al nacer
4	Pinzamiento inmediato del cordón umbilical
5	Diagnóstico de vitalidad deficiente
6	Diagnóstico de ventilación deficiente
7	Diagnóstico de esfuerzo ventilatorio leve o moderado
8	Asistencia ventilatoria no invasiva
9	Asistencia ventilatoria invasiva y/o masaje cardiaco vascular
10	Diagnóstico vitalidad - ventilación minuto 1
11	Diagnóstico vitalidad - ventilación minuto 5
12	Diagnóstico vitalidad - ventilación minuto 10
13	Neonato declarado fallecido
14	Diagnóstico de vitalidad normal
15	Diagnóstico de ventilación normal
16	Pinzamiento Precoz
17	Pinzamiento Habitual o Diferido
18	Traslado a la unidad de cuidado neonatal
19	Traslado con la madre al alojamiento conjunto
A	Asistencia ventilatoria y cardiaco vascular
B	Diagnóstico temporal de vitalidad y ventilación
C	Tipo de pinzamiento realizado

Figura 7: Autómata con superestados que representa el flujograma de Adaptación Neonatal Inmediata de la figura 6

3.3. Metodología

La metodología usada para la realización de este modelo fue realizada por refinamiento incremental. Iniciamos con un modelo con poco nivel de detalle que fue refinado progresivamente como resultado de la interacción entre especialistas de neonatología e ingeniería. Es importante resaltar que la elaboración de este modelo implicó adicionar un gran nivel de detalle aportado por la experiencia e interpretación clínica de los participantes. Como ha sido señalado por ten Teije et al. (2006), el uso de métodos formales de modelamiento para protocolos médicos conlleva inherentemente un análisis, refinamiento de detalle e interpretación que produce, necesariamente, una ampliación del protocolo.

3.4. Relevancia del uso de Statecharts

Es importante comentar que el uso de *Statecharts* en este modelo produce una reducción visual considerable de transiciones (producida por los superestados) y de estados (producida por las transiciones condicionadas).

Según la tabla 2, la condición *NP* significa que el cordón umbilical no ha sido pinzado. Así, las transiciones condicionadas $14 \xrightarrow{IPP(NP)} 15$ y $14 \xrightarrow{CPH(NP)} 16$ solo ocurrirán cuando el cordón umbilical no haya sido pinzado. Desde el punto de vista médico, el pinzamiento del cordón es un hecho irreversible, así que el neonato pasa a la condición *P*, en la cual el cordón umbilical ya ha sido pinzado. Sin usar estas transiciones, se hace necesario adicionar estados sin significado médico en el modelo, dificultando la comprensión.

El uso del formalismo visual de *Statecharts* nos permite describir correctamente y sintéticamente la estructura del procedimiento médico modelado. Sin embargo, es importante comentar que un modelo como el presentado aquí puede ser traducido fácilmente en un autómata finito determinista, posibilitando, así, el uso de métodos de verificación y diagnóstico desarrollados para SEDs modelados por autómatas finitos.

4. Retroalimentación recibida

El modelo presentado en la sección 3.2 fue evaluado por un panel interdisciplinario con personal de la salud, ingeniería y diseño industrial. El uso de autómatas con extensión visual *Statecharts* permitió establecer un lenguaje visual común, entendido por profesionales de diferentes disciplinas. A continuación consignamos algunas de opiniones de los participantes acerca del modelo de adaptación neonatal presentado en este trabajo:

► PROFESIONAL DE LA SALUD: *Crear un modelo que represente un procedimiento rutinario de una*

manera sencilla de comprender, sirve de base para plasmar en un futuro distintos procedimientos interdisciplinarios que permitan plantear nuevos modelos más complejos que incluyen detalles desde diferentes áreas del conocimiento. Sin embargo, se debe reducir aún más la complejidad visual, teniendo en cuenta que a futuro contendrá aún más información.

► PROFESIONAL DE DISEÑO INDUSTRIAL: *Este modelo funciona como complemento en la formación de personal de la salud y facilita la retroalimentación y extensión de la información enseñada en el aula obteniendo un modelo más completo. Incluso, podría en un momento dado, disminuir el margen de error durante el procedimiento clínico. Adoptando este diseño visualmente resulta fácil leer y comprender la información incluso para personas ajenas a la práctica médica convirtiéndose en una posible herramienta de trabajo para investigaciones interdisciplinarias.*

► PROFESIONAL DE INGENIERIA: *El desarrollo de este modelo permite concebir herramientas para presentar las guías y procedimientos médicos de forma interactiva. Estos ser entendidos por personas con formación diferente a la salud, incluyendo, por supuesto, a los pacientes. Esto también permite el desarrollo de simuladores con escenarios médicos de entrenamiento.*

5. Conclusiones

Hemos presentado un modelo de autómata finito con extensión visual para el procedimiento de adaptación neonatal inmediata. El modelo desarrollado contiene niveles de detalle, consistencia y comprensión que amplían el flujograma original que describe el procedimiento. El modelo es una herramienta de apoyo para la enseñanza en neonatología y un paso en el desarrollo de herramientas de simulación para investigación en el área.

Los modelos de autómatas finitos y los *Statecharts* proveen un lenguaje visual común que permiten la interacción entre especialistas de diferentes áreas para desarrollar modelos de procedimientos médicos.

Como trabajos futuros pueden usarse autómatas temporizados para reducir aún más la complejidad visual. Es también importante introducir la noción de *observación parcial* (signos no visibles en el paciente) para que los especialistas médicos dispongan de herramientas de apoyo en diagnóstico o pronóstico a partir de los modelos de sistemas de eventos discretos desarrollados.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y al Departamento

de Pediatría de la Universidad de Colombia por su apoyo en este trabajo.

Referencias

- Albanese, A., Cheng, L., Ursino, M. y Chbat, N. W. (2016). An integrated mathematical model of the human cardiopulmonary system: model development., *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology* **310**(7): 1522–1539.
- Apgar, V. (1953). A proposal for a new method of evaluation of the newborn infant, *Current Researches in Anesthesia and Analgesia* **32**(4): 260–267.
- Beate, J., Engelbert, T., Uwe, S. y Karl-Peter, P. (2010). Tutorial in medical decision modeling incorporating waiting lines and queues using discrete event simulation, *VALUE IN HEALTH* **13**(4): 501 – 506.
- Caicedo-Cuenca, L. M. (2017). Enfoque de la hipertensión pulmonar en el paciente pediátrico, *Rev Colomb Cardiol* **24**(1): 89–97.
- Chair, M. H. W., Aziz, K., Escobedo, M. B., Kapadia, V. S., Kattwinkel, J., Perlman, J. M., Simon, W. M., Weiner, G. M. y Zaichki, J. G. (2015). Guidelines update for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care, *Technical report*, American Heart Association.
- Currea, S. (2004). *La adaptación neonatal inmediata. La reanimación neonatal.*, Unibiblos, Bogotá.
- Emerson, D., Genuis, M. y Quynh, D. (2013). The effect of medical trainees on pediatric emergency department flow: A discrete event simulation modeling study, *ACADEMIC EMERGENCY MEDICINE* **20**(11): 1112 – 1120.
- Grigorov, L. y Rudie, K. (2011). Dynamic discrete-event systems with instances for the modeling of emergency response protocols, *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, pp. 4478–4483.
- Guo, C., Ren, S., Jiang, Y., Wu, P., Sha, L. y Jr., R. B. B. (2016). Transforming medical best practice guidelines to executable and verifiable statechart models, *7th ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, ICCPS 2016, Vienna, Austria, April 11-14, 2016*, pp. 34:1–34:10.
- Harel, D. (1987). Statecharts: A visual formalism for complex systems*, *Science of Computer Programming* **8**(1): 231 – 274.
- James, D. y Warren-Forward, H. (2015). Development of consensus statements for pregnancy screening in diagnostic nuclear medicine: a delphi study., *J Nucl Med Technol* **43**(1): 74 – 79.
- Keltya, Sally F. and Julianb, R., Bruenisholzc, E. y Wilson-Wildec, L. (2018). Dismantling the justice silos: Flowcharting the role and expertise of forensic science, forensic medicine and allied health in adult sexual assault investigations, *Forensic Science International* **285**(1): 21–28.
- Mencarini, P., Bellagamba, R., Oliva, A., Ghirga, P., Giancola, M., Corpolongo, A., Ascoli Bartoli, T., De nardo, P., Baiocchi, A., Del Nonno, F., Narciso, P. y Nicastrì, E. (2016). Pulmonary tuberculosis followed by sarcoidosis in an hiv-infected patient: A case report and a simplified diagnostic flowchart for diagnosis and treatment of sarcoidosis, *Respiratory Medicine Case Reports* **19**(1): 150–154.
- Méry, D. y Singh, N. K. (2012). Medical protocol diagnosis using formal methods, in Z. Liu y A. Wassong (eds), *Foundations of Health Informatics Engineering and Systems*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–20.
- Myers, L. y Capper, W. (2002). A transmission line model of the human foetal circulatory system, *Med Eng Phys.* **24**(4): 285 – 294.
- Rosalie, W. M. (2006). *Discrete event modeling and control of the neonatal resuscitation program algorithm.*, Master's thesis, Memorial University of Newfoundland, Newfoundland.
- Silverman, W. A. y Andersen, D. H. (1956). A controlled clinical trial of effects of water mist on obstructive respiratory signs, death rate and necropsy findings among premature infants, *17*(1): 1–10.
- ten Teije, A., Marcos, M., Balser, M., van Croonenborg, J., Duelli, C., van Harmelen, F., Lucas, P., Miksch, S., Reif, W., Rosenbrand, K. y Seyfang, A. (2006). Improving Medical Protocols by Formal Methods, *Artificial Intelligence in Medicine* **36**(3): 193–209.