



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Modelado y análisis de sistemas de salud basado en vías clínicas

Modeling and analysis of healthcare systems based on clinical pathways

Autor/es

Ismael Moreno Varea

Director/es

Cristian Mahulea

Jorge Albareda Albareda

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

Grado en Ingeniería Eléctrica

Escuela de Ingeniería y arquitectura

2017



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____

Resumen

Este proyecto, desarrollado en colaboración con el Hospital Clínico Universitario (HCU) “Lozano Blesa” de Zaragoza, consiste en un estudio basado en las vías clínicas para ver su potencial en la gestión hospitalaria. Se considerarán dos vías clínicas, la de artroplastia de cadera y la de artroplastia de rodilla que han sido modeladas en el *lenguaje de modelado unificado* (UML por su sigla en inglés) y transformadas a modelos formales (redes de Petri). Utilizando la simulación de los modelos formales mostramos como las vías clínicas con algunas informaciones adicionales (uso de recursos, tiempo de las actividades, etc.), se pueden utilizar para optimizar los tiempos de actuación, optimizar los recursos hospitalarios, etc.

Se ha trabajado con dos herramientas diseñadas e implementadas en la Universidad de Zaragoza, dentro del proyecto DPI2014-57252-R: “Modelos y métodos formales para la gestión de los servicios de salud” [5]. La primera herramienta llamada HEAT-Monitor se ha implementado para monitorizar los pacientes ingresados en el HCU de Zaragoza que siguen una vía clínica. La segunda herramienta llamada HEAT-Designer se utiliza para modelar y analizar las vías clínicas en lenguaje UML y permite al mismo tiempo transformaciones a modelos de redes de Petri para un análisis formal. Siendo las dos herramientas en su versión beta, durante el proyecto se participa en sus mejoras, identificando los fallos y proponer ideas para sus mejoras. Este trabajo es la continuación del trabajo fin de grado de José Barreto (Grado en Tecnologías Industriales) que consistió en el modelado de las vías clínicas en lenguaje UML. El TFG de José Barreto también incluyó algunas simulaciones utilizando modelos de redes de Petri. En el proyecto actual se pretende ampliar los estudios por simulación utilizando modelos de redes de Petri definiendo metodologías para poder estudiar distintos indicadores del sistema de salud con los modelos formales, por ejemplo la utilización de las camas.

Para poder hacer un análisis matemático utilizando las redes de Petri se usa la herramienta TimeNET, una de las mejores herramientas para simulación de redes de Petri de tamaño grande existente. Se mostrará cómo se puede utilizar la simulación de las redes de Petri para calcular probabilidades de que todos los pacientes ingresados acaben sus tratamientos en la jornada laboral del personal médico, se analizará el uso de los recursos para identificar los cuellos de botellas y se hará un estudio para estimar las camas libres al final de semana. Por otro lado, se hablará de sus limitaciones en cuanto el modelo es grande (número grande de nodos en la red de Petri) y se planteará el uso de otro herramienta llamada CPN Tools.

Índice

Resumen	4
Índice	5
1 - Introducción	6
2 - Alcance	7
3 - Modelado de las vías clínicas	8
3.1 - UML y HSS	8
3.2 - Redes de Petri	9
4 - Herramientas software	12
4.1 - HEAT-Designer	12
4.2 - TimeNET	14
4.3 - HEAT-Monitor	16
4.4 - CPN Tools	17
5 - Exploración modular de los modelos	20
5.1 - Número óptimo de médicos	20
5.2 - Tiempo medio de una vía clínica	23
6 - RdP coloreas vs RdP de recursos	27
7 - Posibles mejoras a implementar	29
8 - Conclusiones	31
9 - Bibliografía	32
Anexo 1. Vías clínicas modeladas en HSS	33
Anexo 2. Cuellos de botellas	41
Anexo 3. Simulaciones adicionales para el estudio de número óptimo de médicos	49
Anexo 4. HEAT-Monitor, simulaciones	53
Anexo 5. Camas libres	56
Anexo 6. Modelado de las redes coloreadas en CPNTools	60

1 - Introducción

Debido al incremento de la esperanza de vida, aumenta también la morbilidad de la población, con su consecuente incremento en la demanda de consulta médica y a la vez, aumento de ingresos hospitalarios. En los servicios de Ortopedia y Traumatología se observa la misma tendencia. El trabajo fin de grado forma parte de una tarea de un proyecto de investigación CICYT (DPI2014-57252-R) en el cual se propone utilizar las vías clínicas para la gestión hospitalaria.

Una vía clínica es una herramienta de gestión clínica para facilitar la atención sistemática y multidisciplinar del paciente. Una vía clínica es la secuencia de todos los tratamientos y curas que tienen que seguir los pacientes con una misma patología clínica [3]. Ella no reemplaza el juicio clínico del profesional sanitario, en particular del especialista médico pero cualquier desviación debe ser bien justificada. Una vía clínica puede desarrollarse para la atención del paciente antes, durante y/o después de la hospitalización y permite la anticipación de los problemas asistenciales, la evaluación de los objetivos planteados, la comparación con los estándares de atención definidos previamente y la innovación en las soluciones. Estas vías suelen crearse para procedimientos médicos de gran volumen, alto riesgo o alto coste o requieren la cooperación de múltiples profesionales.

Las vías clínicas, diseñadas, revisadas y actualizadas por los médicos, no contienen información alguna de los recursos necesarios para llevar a cabo todos los tratamientos y tampoco consideran las interrelaciones que pueden aparecer cuando varias vías clínicas se ejecutan en paralelo. En el proyecto CICYT mencionado anteriormente, se propone un lenguaje de modelado gráfico basado en los diagramas de actividades UML para poder añadir estas informaciones durante el diseño de las vías clínicas. Los diagramas de actividades son muy fáciles de utilizar pero no tienen una semántica bien definida siendo necesarias transformaciones a modelos formales para poder utilizarlas en la gestión y no solo para el seguimiento de los pacientes.

En el mismo proyecto se han propuesto métodos de transformación de estos modelos a redes de Petri que son formalismos matemáticos de modelado de los sistemas discretos. Utilizando los resultados existentes en la literatura de las redes de Petri, en este proyecto se utilizan métodos basados en simulación de procesos y análisis formal para estudiar propiedades del sistema de salud y además estudiar sus prestaciones.

Para realizar los siguientes estudios se han utilizado los programas HEAT-Designer para modelar las vías clínicas en lenguaje UML y además transformarlas a redes de Petri, y TimeNET que se ha utilizado para realizar simulaciones de las redes de Petri.

2 - Alcance

Se intenta conseguir unos resultados correctos para los análisis de un modelo que muestre el sistema que sigue el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU. A medida que se vaya implementando la herramienta y se vayan recopilando datos reales, en un futuro se podrán realizar análisis más realistas, de modo que se ajustará más a la realidad los modelos.

La implementación de los distintos códigos de la herramienta se ha llevado a cabo por Luis Parrilla y Emanuele Vitolo, ingenieros informáticos, contratados por el proyecto para esta implementación.

Las tareas asignadas a mí dentro del equipo de trabajo del proyecto han sido de estudiar las vías clínicas, familiarizarse con las herramientas HEAT y TimeNET, búsqueda de fallos y mejoras en la herramienta HEAT, desarrollar sistemas con las vías clínicas para estudiar su evolución (como el estudio de las camas), definir indicadores médicos para el estudio óptimo de estos y comparar las redes coloreadas con las de recursos. Además se ha estudiado la semántica temporal para comprender el funcionamiento de CPN Tools, familiarizarse con esta herramienta, crear las redes coloreadas de las vías clínicas de la intervención quirúrgica de la fractura de cadera y fractura de rodilla en CPN Tool y estudiar los modelos en dicha herramienta. Se ha empezado a estudiar la herramienta CPN Tools porque TimeNET no soporta las redes coloreadas de gran tamaño.

3 - Modelado de las vías clínicas

Las vías clínicas se desarrollan por los médicos especialistas en el lenguaje UML propuesto utilizando la herramienta HEAT-Designer. En este proyecto hemos utilizado los modelos UML desarrollados en otro TFG, modelos que incluyen información del uso de recursos y el intercambio de información. En éste capítulo se introduce el lenguaje UML utilizado y los modelos formales que se obtienen por transformación con el propósito de hacer un análisis formal.

3.1 - UML y HSS

Un UML es un lenguaje de modelado visual introducido inicialmente para modelar los sistemas software. Actualmente, UML se utiliza en muchas otras aplicaciones siendo un lenguaje gráfico con un número pequeño de primitivas. El UML consiste en muchos diagramas diferentes llamados también modelos correspondientes a distintos puntos de vista de un sistema. Para modelar las vías clínicas se utilizan dos tipos de diagramas: (a) diagrama de clase para especificar los recursos disponibles en el sistemas y (b) diagrama de actividad para describir el flujo (la secuencia) de tratamientos que debe seguir un paciente en caso de una determinada enfermedad.

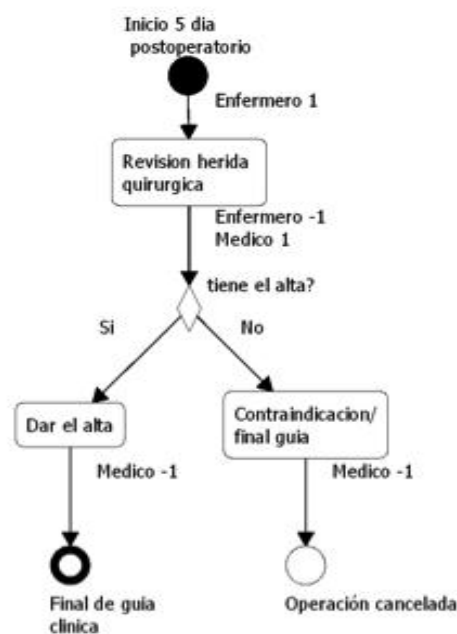


Figura 1. Parte de una vía clínica modelada en UML/HSS

Para modelar las vías clínicas, los diagramas de actividades UML se extienden añadiendo etiquetas en los arcos para poder especificar la asignación/liberación de los recursos y etiquetas en los nodos de actividad para especificar la duración de tiempo. La extensión se llama perfil UML que lo hemos llamado *Healthcare System Specification* (HSS). Los elementos de los diagramas de actividades en HEAT-Designer utilizados para modelar las vías clínicas son:

- *Nodo inicial*: mostrado como un círculo sólido, indica el inicio de la vía clínica o de un día de la vía clínica (por ejemplo el nodo 'Inicio 5 día postoperatorio' en la Fig. 1).
- *Nodo de acción*: representado como rectángulo modela una acción, en nuestro caso un tratamiento, cura o cualquier actividad que tiene que seguir un paciente (por ejemplo los nodos: 'Revisión herida quirúrgica', 'dar de alta' y 'contra indicación/final de guía' en la fig. 1).
- *Nodo de elección*: representado como un rombo, se utiliza cuando el sistema puede tomar dos caminos diferentes (hay una elección) (por ejemplo el nodo 'tiene el alta?' en la fig. 1).
- *Nodo de unión*: representado también como un rombo, une dos caminos para acabar en uno.
- *Nodo final*: representado por un círculo sólido con un hueco, indica el final de la vía o de un día de la vía clínica (por ejemplo el nodo 'final de guía clínica' en la fig. 1).
- *Arcos*: para unir los distintos tipos de nodos mencionados anteriormente.

El lenguaje UML, al no tener una semántica formal bien definida, no se puede utilizar para simular y analizar el sistema. Por eso, en este trabajo (y en el proyecto de investigación) se transforman los modelos HSS a redes de Petri que es un lenguaje formal (matemático) de modelado de sistemas (de eventos) discretos. Las redes de Petri se obtienen a partir de los diagramas UML aplicando las reglas de transformación descritas en [4].

3.2 - Redes de Petri

Una red de Petri se puede definir como un grafo bipartito (con dos tipos de nodos, que son los lugares y las transiciones) compuesto por: (a) un conjunto finito de lugares (que representan variables de estado del sistema), (b) un conjunto finito de transiciones (que representan el conjunto de eventos cuya aparición (disparo) provoca la modificación del estado del sistema) y, (c) un conjunto de arcos que conectan un lugar con una transición o una transición con un lugar. Cada lugar puede contener un número finito de marcas o *tokens* que representa el estado local (o el valor) de la variable de estado que modela el lugar. Las marcas pueden representar las unidades de materia prima, productos en proceso o productos terminados así como la disponibilidad de las maquinas. Para este proyecto las marcas representan los médicos, enfermeros/as, auxiliares, pacientes y autotransfusión. Una red de Petri con marcas en los lugares es un sistema de red de Petri.

Los arcos tienen peso unitario por defecto; si no es 1, el peso se marca en el arco. Una transición está *habilitada* o *sensibilizada* cuando el número de marcas en cada uno de sus lugares de entrada es al menos igual al peso del arco que va desde el lugar hasta la transición. Una transición sensibilizada puede dispararse, consumiendo marcas de cada lugar de entrada. El número de marcas que se consumen de un lugar de entrada p_i es igual al peso del arco que conecta p_i con la transición que se está disparando. Asimismo, con el disparo de una transición se crean marcas en cada lugar de salida de la transición, el número de marcas creadas en cada lugar de salida p_j siendo igual al peso del arco que conecta la transición con p_j . En la fig. 2 se presenta una red de Petri con el marcado (estado) anterior y posterior al disparo de la transición t_1 .

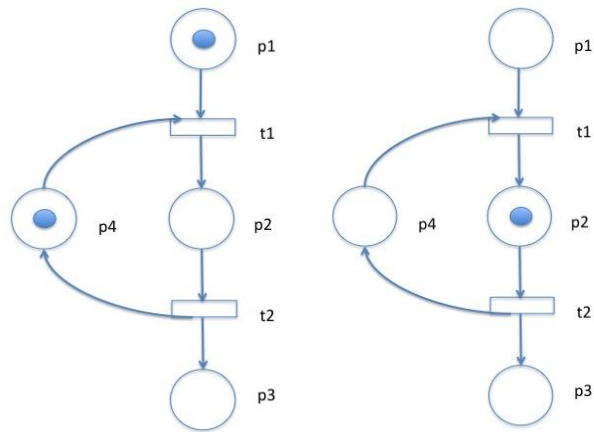


Figura 2: Disparo de la transición t_1

Las redes de Petri usadas en el proyecto se han obtenido a partir de la transformación de los diagramas UML mediante la herramienta HEAT-Designer.

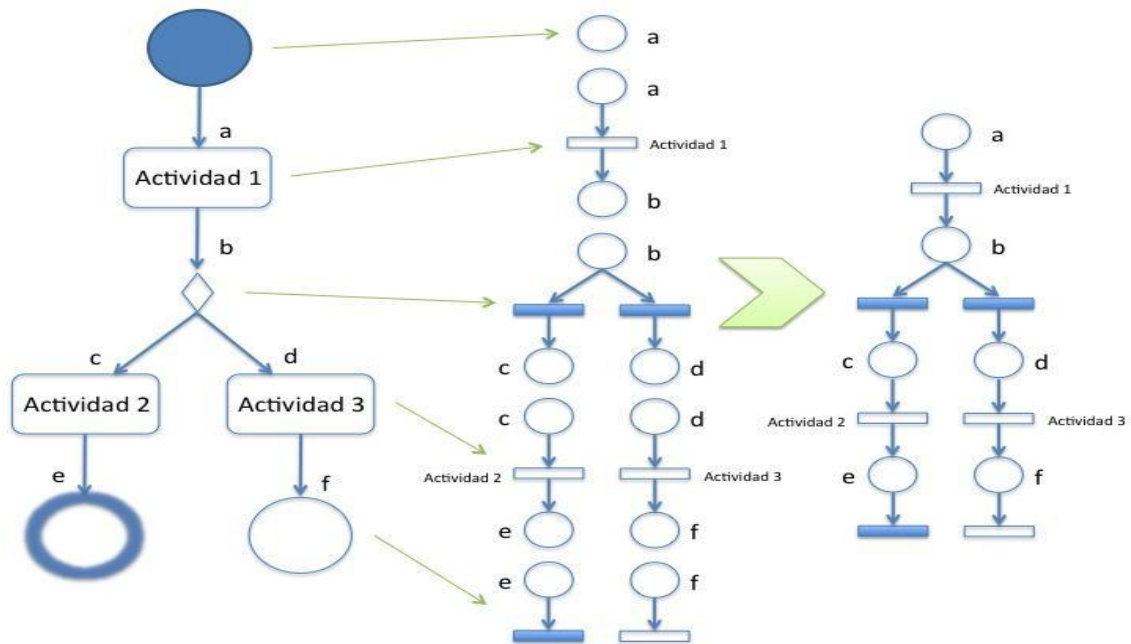


Figura 3: Paso a paso: transformación modelo UML/HSS a red de Petri

En la fig. 3 se ilustra a la derecha la red de Petri que se obtiene aplicando las reglas de transformación (descritas en [4]) al diagrama UML/HSS de la misma figura a la izquierda. Los arcos del diagrama UML/HSS pasan a ser lugares en la red de Petri, las actividades se transforman en transiciones temporizadas con un lugar de entrada y uno de salida correspondientes a los arcos de entrada y salida. En el caso de tener una elección (representada por un rombo en la fig. 3 de la izquierda) pasará a transformarse en dos transiciones inmediatas y estas tendrán un lugar de entrada común y dos lugares de salida independientes. Finalmente utilizando la fusión de lugares comunes se obtiene el modelo global (fig. 3 de la derecha).

Después de modelar el flujo de los pacientes, se introducen al modelo los recursos disponibles en el sistema y los registros médicos utilizados. Cada recurso se modelará con un lugar con un número inicial de marcas igual al número de recursos disponibles. Los diagramas de actividades UML se han extendido definiendo un perfil llamado HSS que permite especificar en cada arco del diagrama UML la asignación y liberación de recursos como el uso de la información de los registros médicos. En la fig. 4 se consideran dos recursos modelados por los lugares “Enfermero/a” y “Médico”. Cuando en el diagrama HSS se asigna un recurso humano, en la red de Petri desde el lugar de este mismo recurso se comparte la marca o marcas (tantas como se asignen en el HSS) con un arco de entrada hasta la transición que le corresponda. Lo mismo ocurrirá para los recursos liberados en el HSS, que en la red de Petri se devuelve la o las marcas desde la transición correspondiente al lugar de los recursos correspondiente mediante otro arco.

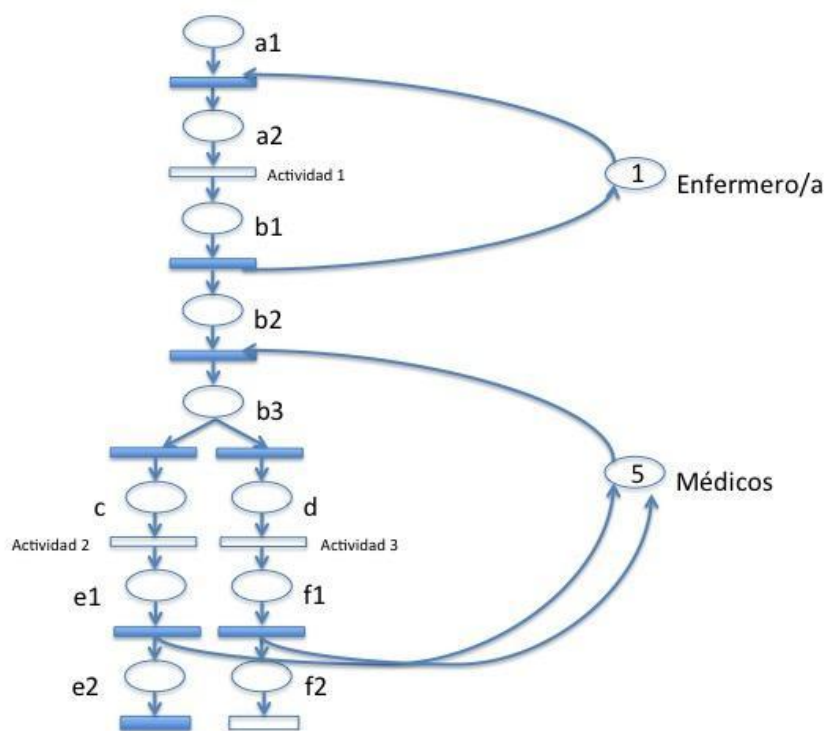


Figura 4: Paso a paso: transformación HSS a red de Petri. Uso de los recursos

En la transformación de HSS a Petri se obtienen redes coloreadas, redes de Petri que a diferencia de una red convencional, las marcas son distintivas, pudiéndose hacer un seguimiento de cada paciente en todo momento.

4 - Herramientas software

4.1 - HEAT-Designer

En la fig. 5 se presenta el interfaz de HEAT-Designer con un diagrama HSS abierto. Lo primero que hay que hacer para usar esta herramienta es crear o seleccionar (en caso de que ya esté creado) un escenario que corresponde a un departamento del hospital formado por varias vías clínicas, recursos disponibles y registros médicos. La selección se hace utilizando el menú 'Escenario'. Desde el menú 'Vías Clínicas' se crea o abre (si ya estuviese creada) una vía clínica. Si se ha creado una vía clínica es necesario vincularla/sincronizarla a un escenario desde el menú 'Vías Clínicas/Administrar'. Estas vías clínicas se crean mediante diagramas HSS, además se puede especificar en etiquetas la asignación o liberación de los recursos humanos (médicos, enfermeros/as y auxiliares) así como los tiempos de las actividades.

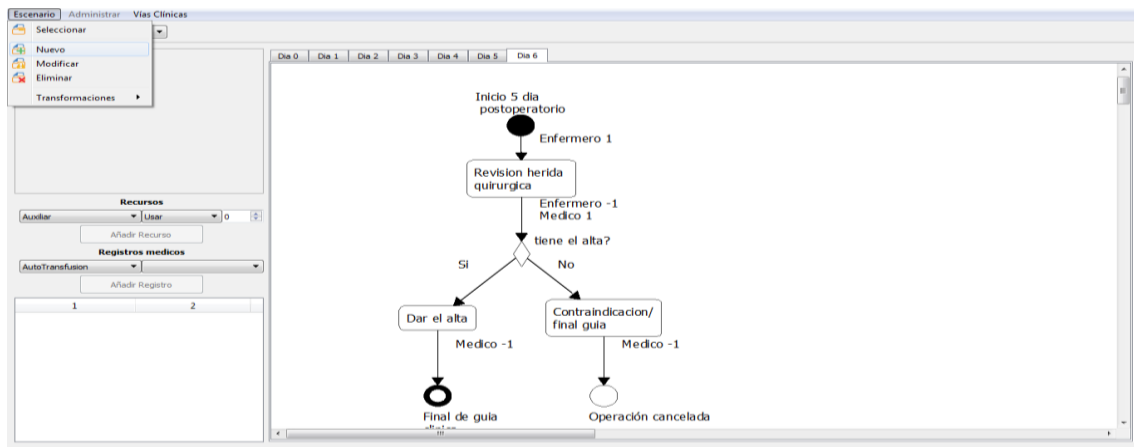


Figura 5: Ejemplo de un diagrama HSS en HEAT-Designer

Para crear una vía clínica hay que elegir la opción 'nueva' desde el menú 'vías clínicas' añadiéndole un nombre a esta. El nodo de inicio del día 0 aparece de forma automática y con el ratón se añaden las actividades, las decisiones y las uniones una detrás de otra. Al final se añade el nodo final. Para ello se va generando el diagrama pulsando en el botón derecho del ratón sobre el nodo inicial o el último generado y aparecerá un menú como muestra la fig. 6 para elegir la siguiente actividad, decisión o nodo final.

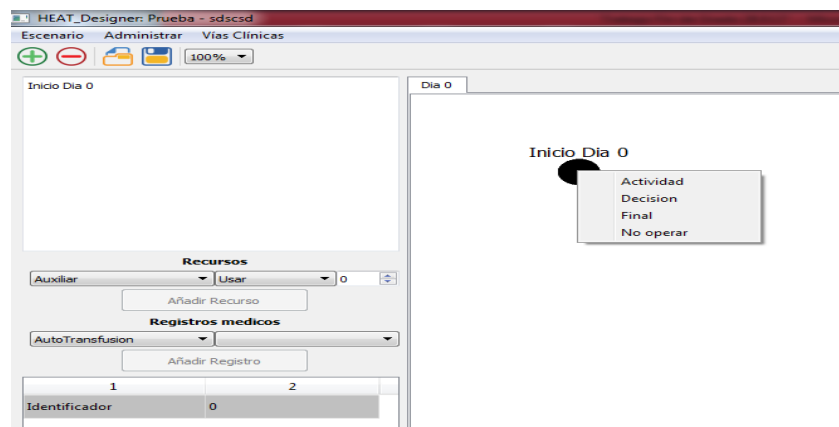


Figura 6: Crear un diagrama HSS

La vía clínica modelada en lenguaje HSS se puede transformar a una red de Petri (ver en fig. 7).

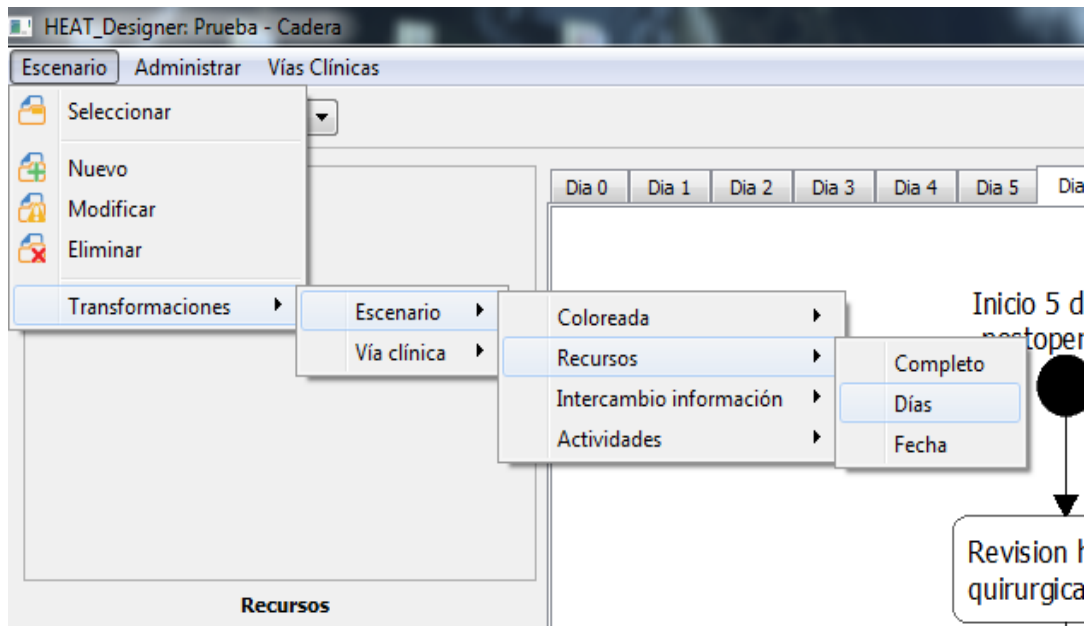


Figura 7: Transformar HSS a redes de Petri

Para ello desde en el menú 'Escenario' la opción 'transformaciones' permite transformar el Escenario o la Vía Clínica deseada a una red de Petri coloreada que corresponde al modelo completo o en redes de recursos, de actividades o de información que son aproximaciones de la red coloreada. Se puede aplicar la transformación en los 4 tipos de redes tomando todos los días juntos, separados por días o por fecha.

- Las redes coloreadas son las más completas en cuanto a información.
- Las redes de recursos son redes sin colores que contienen solo el modelo del flujo de pacientes y el uso de los recursos.
- Las redes de intercambio de información son redes sin colores conteniendo el modelo del flujo de pacientes y el uso de los registros médicos (como por ejemplo el de autotransfusión).
- Las redes de actividad son redes de Petri sin colores que contienen solo el modelo del flujo de pacientes (la secuencia de tratamientos y curas que tienen que seguir los pacientes con una determinada enfermedad).

4.2 - TimeNET

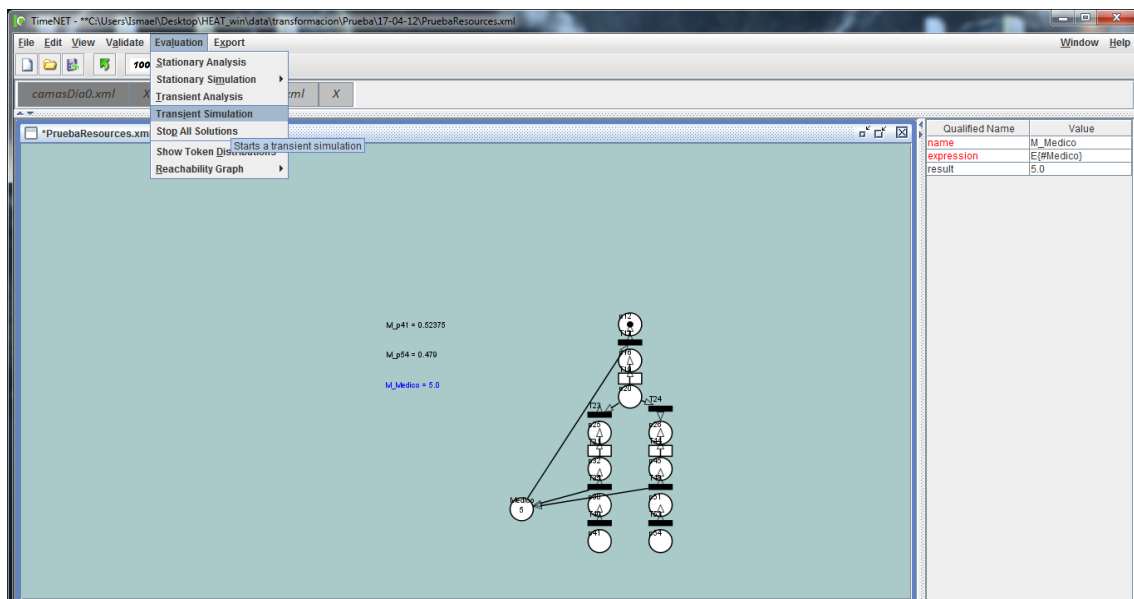


Figura 8: Interfaz gráfica de la herramienta TimeNET

Para el análisis y simulación de las redes de Petri se obtienen después de la transformación, se utiliza la herramienta TimeNET (fig. 8). La herramienta ha sido desarrollada por el grupo *Systems and Software Engineering*, Universidad Técnica de Berlín, Alemania y se puede descargar desde su página web [6].

Una vez abierto un modelo de red de Petri en formato XML se pueden realizar las simulaciones pertinentes desde el menú Evaluation. En este trabajo se usa la simulación del régimen transitorio. En particular, nos interesa la probabilidad del estado del sistema después de un determinado tiempo (por ejemplo 8 horas que es la jornada laboral del personal médico). Para calcular las probabilidades se obtiene el número de marcas en los lugares deseados (como el lugar con el que finaliza la red de Petri, que representa que el paciente finalizó el día clínico) de la red y se dividen entre sus recursos totales de la misma red (pacientes que se tratan en ese mismo día clínico), utilizando una métrica disponible en el TimeNET. La simulación se hace con un intervalo de confianza que se puede seleccionar como parámetro de entrada (ver en la fig. 9 indicado con la flecha azul).

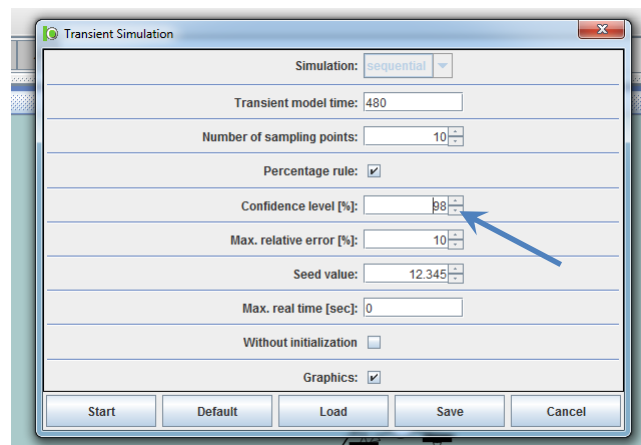


Figura 9: TimeNET (simulación transitoria)

Para calcular el número medio de marcas en un lugar se utiliza la métrica 'E{#p54}', donde E significa la esperanza (el valor medio) y $p54$ es el nombre del lugar a calcular. Después de la simulación, los valores medios se representan en la pantalla (ver en la fig. 10).

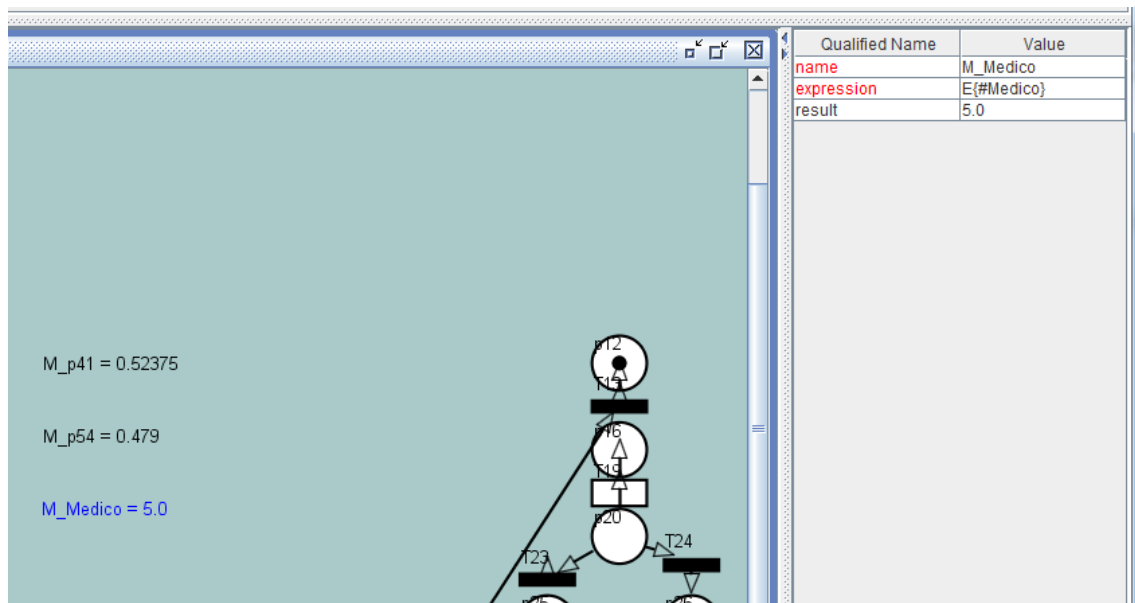


Figura 10: TimeNET (Cálculo medio de marcas)

Tomando el valor medio obtenido después de una simulación con la métrica anterior y dividiéndolo al número de marcas del lugar inicial que modela los pacientes que inician el tratamiento del día x , se obtiene la probabilidad de que haya pacientes en el lugar. En nuestros estudios se consideran los lugares que modelan la última actividad del día y se obtiene el número de marcas después de un tiempo determinado (8 horas). Dividiendo el resultado al número total de pacientes que inician el día clínica se obtiene la probabilidad que finalicen todos los tratamientos del día en 8 horas. En el caso de los recursos, se obtiene el número medio de marcas en el lugar que modela el recurso y dividiéndolo al número de recursos disponibles se obtiene la utilización del recurso.

4.3 - HEAT-Monitor

Esta herramienta permite a partir de los diagramas HSS creadas en HEAT-Designer, hacer un seguimiento de los pacientes siguiendo determinadas vías clínicas. En la fig.11 se puede ver su interfaz de HEAT-Monitor.

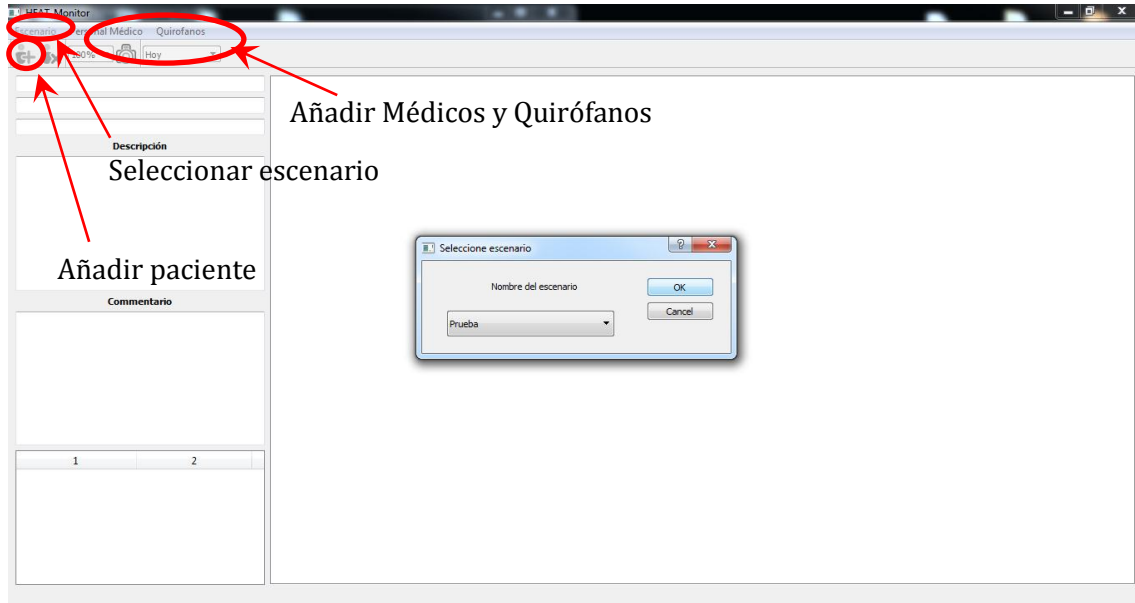


Figura 11: HEAT-Monitor (inicio)

Después de seleccionar el escenario creado en HEAT-Designer, se añaden los recursos disponibles (humanos y materiales). Asimismo, se tiene que especificar los quirófanos que tienen a su disposición indicando los días que se usarán para operar. El paso siguiente es de añadir los pacientes que tienen fecha para ingresar.

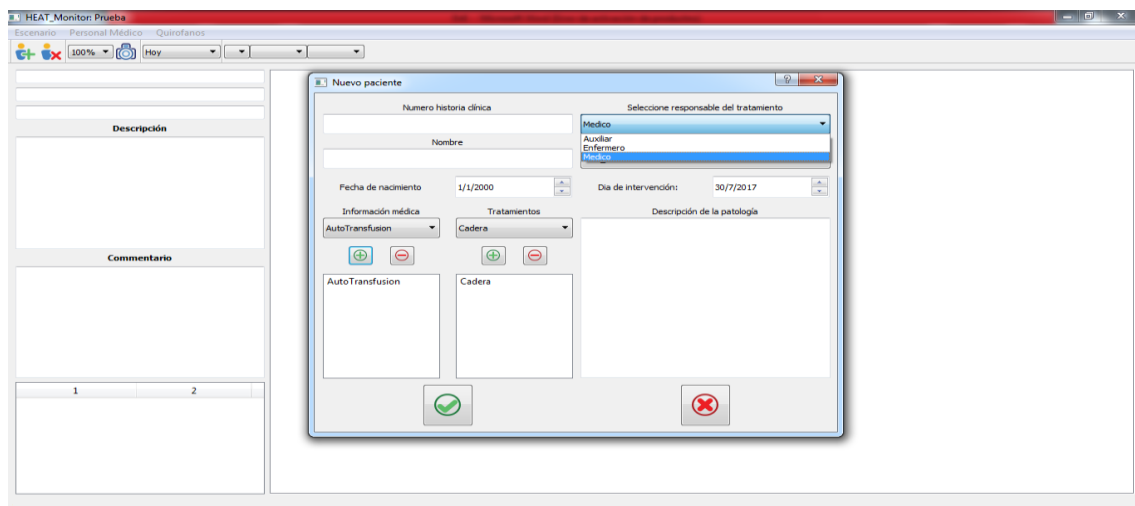


Figura 12: HEAT-Monitor (Añadir pacientes)

Este es el cuadro que hay que rellenar para añadir pacientes (fig. 12). Hay que introducir el nombre del paciente, asignarle un médico responsable, seleccionar los tratamientos que le corresponden a este paciente en especial, introducir la fecha de operación y además hay un cuadro de texto en el que se escribe un resumen de la patología (hay que rellenar todos los comandos para que no dé error). Cuando este cuadro emergente esté rellenado se

acepta y ya está el paciente incluido en la lista. Así se haría uno a uno hasta cubrir los quirófanos de cada día.

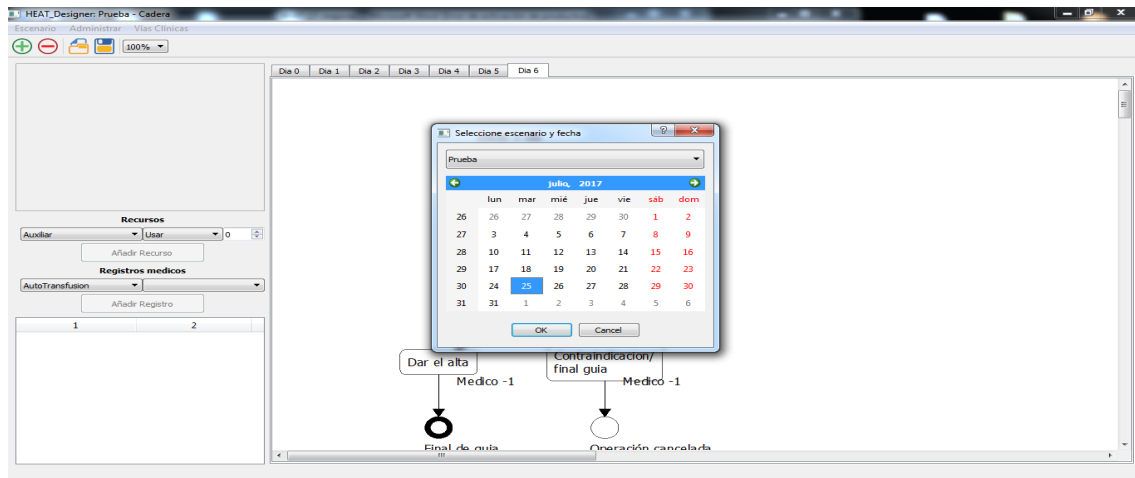


Figura 13: HEAT-Designer (Transformación a red de Petri por fecha)

El programa guarda automáticamente el historial de los pacientes, y se pueden obtener los modelos de redes de Petri correspondiente al escenario actual.

4.4 – CPN Tools

CPN Tools es una herramienta que permite simular y analizar redes de Petri coloreadas [4]. En este proyecto, se ha utilizado esta herramienta para simular los modelos de redes coloreadas que se obtienen por transformación desde un modelo UML. Antes de trabajar con esta herramienta se ha probado hacer la simulación y el análisis en la herramienta TimeNET para que sea la misma herramienta que se utilizó para las redes sin colores. Como se mencionará luego, la herramienta TimeNET no es muy robusta y en caso de modelos grandes no se ha conseguido analizar los modelos.

Para crear una red de Petri coloreada en CPNTools, sobre la pantalla principal, se mantiene pulsado el botón derecho del ratón para elegir la opción 'New Net' sobre el menú emergente (fig.14 a la izquierda el menú del ratón y a la derecha abierta la hoja para crear la red).

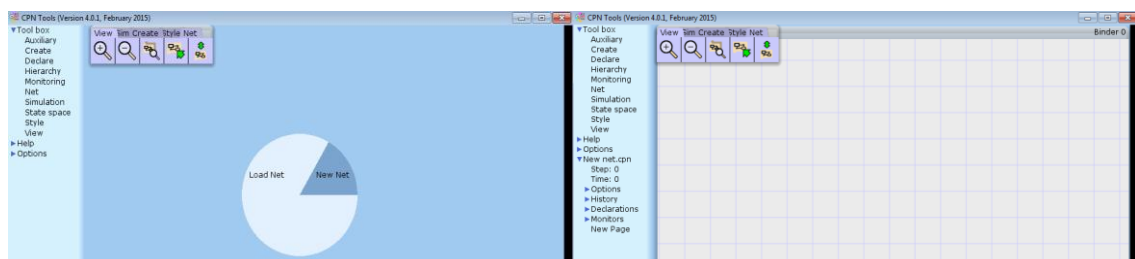


Figura 14: Crear red de Petri coloreada en CPN Tools

Para añadir nodos y arcos se utiliza el menú del ratón (mantener botón derecho) o del cuadro 'Create' que se puede extraer del menú de la izquierda en 'Tool box' arrastrándolo con el ratón a la hoja cuadrículada. Con este menú se pueden añadir lugares, transiciones y arcos. Con el aspa roja se pueden eliminar partes de la red (fig.15 en la parte superior de la imagen se ve el menú 'Create').

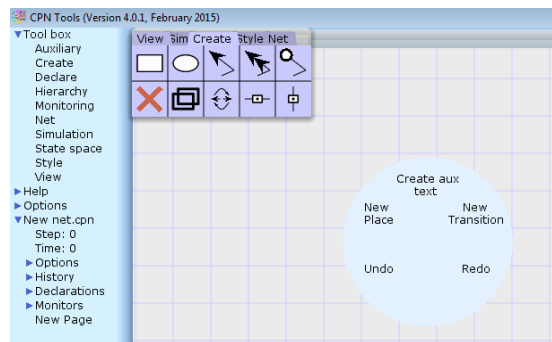


Figura 15: Menú create

Para crear las clases de colores, hay que utilizar el menú de la izquierda con el botón derecho sobre '*Declarations*' (en este área no solo se definen las clases de colores sino que además se definen las variables y las funciones). Por ejemplo, una clase de colores de tipo entero se define de la siguiente forma: '*colset NUMERO=int*'. Luego con una pulsación al tabulador sobre un lugar se indicará que clase de colores admite el lugar. Se pueden utilizar las flechas hacia arriba y hacia abajo y se selecciona el tipo de color. La clase de color asignada a un lugar identifica el tipo de marcas que se pueden almacenar en el lugar. Cada marca tiene un color distinto de la clase correspondiente. Por ejemplo, si un lugar ha sido definido de la clase '*NUMERO*' definida antes, el lugar puede contener marcas números entero, por ejemplo una marca 1 (1`1) o tres marcas 2 (3`2). Se puede observar que de esta forma, las marcas de un lugar se pueden distinguir.

Si se quiere temporizar la red, se pueden asignar duraciones de tiempo a las transiciones (en CPN Tools existe la posibilidad de asignar tiempo en las inscripciones de los arcos, opción que no se contempla en este proyecto). Para asignar duraciones a las transiciones se pulsa dos veces el tabulador con la transición seleccionada y después de "@+" se introduce el valor numérico del tiempo que se quiera. Como el tiempo de las actividades clínicas no es constante, se utilizarán números aleatorios con funciones de probabilidad exponencial. Para eso, se define en la sección de '*Declarations*' una función '*expTime(Y)*' que devuelve un número aleatorio.

Una transición temporizada se dispara después de estar sensibilizada el tiempo dado por la duración asignada. Si en la definición de una clase de colores se añade al final la palabra '*timed*', las marcas (o los colores) de esta clase tienen información adicional del último momento de tiempo cuando la marca haya estado disponible.

En las inscripciones de los arcos se utilizan variables que tienen que ser declaradas de la clase de color del lugar que conecta. La variable se asigna a un color/marca durante el disparo de la transición.

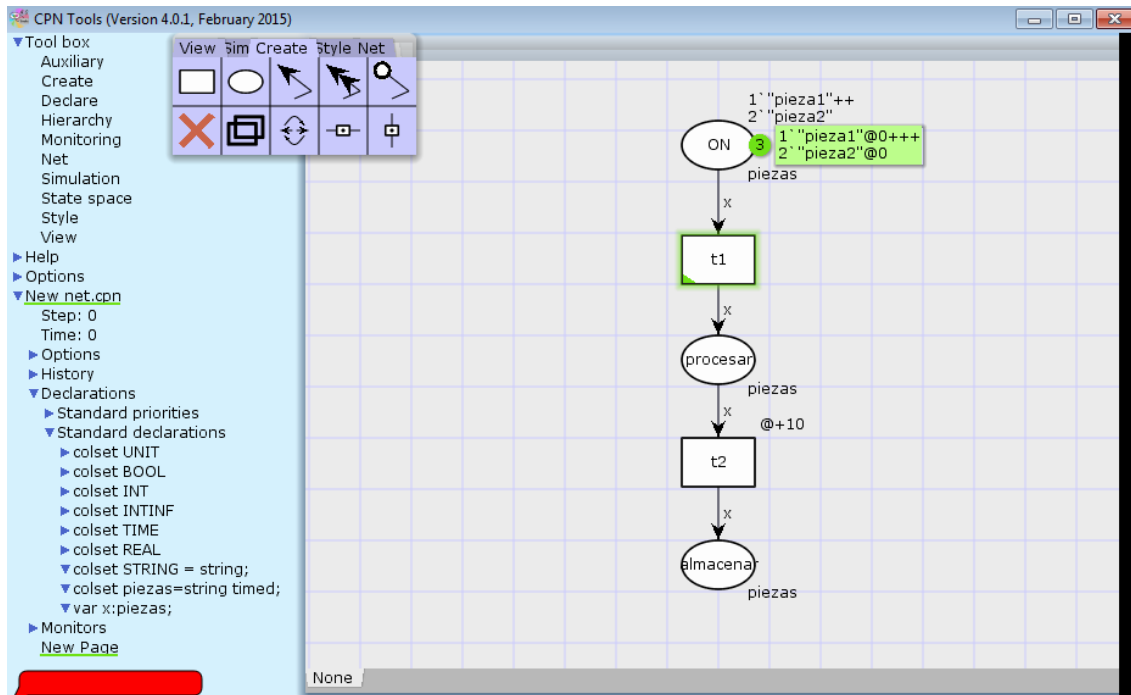


Figura 16: CPN Tools – definición de colores

Desde el menú 'Net' se puede guardar la red creada y desde el menú 'Simulation' se realizan las simulaciones. Una vez creadas las redes de Petri, se pueden crear agrupaciones. Por ejemplo para este proyecto se agrupan las redes en días clínicos como muestra la fig. 17.

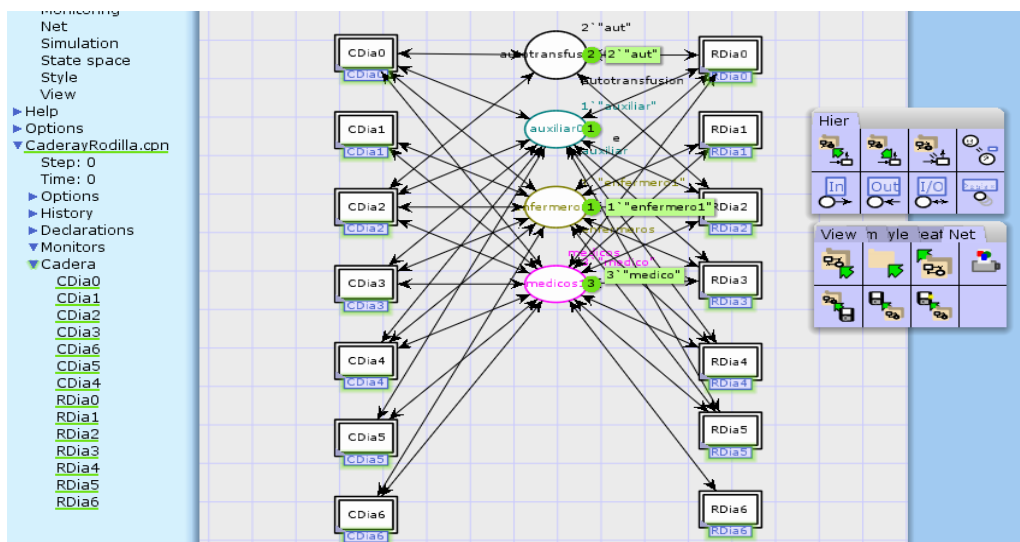


Figura 17: Vías clínicas agrupadas por días clínicos

Para ello en el *Tool box* extraemos el menú *View* y *Hierarrchy* (son los que aparecen en la fig.17 a la derecha). Con *View* primero tenemos la opción "creates a new group" para crear una nueva capa sobre nuestra página de edición y con la opción "Toglgess whether an element belongs to a group" se puede seleccionar los elementos que van a componer el grupo. Ahora con *Hierarrchy* con la opción "Moves a transition to subpage" se crea finalmente el subgrupo. Más de CPN Tools en [7].

5 - Exploración modular de los modelos

En esta sección se utilizan los modelos de redes de Petri para ilustrar sus posibilidades en la gestión hospitalaria. Como se ha comentado en las secciones anteriores, las dos vías clínicas están divididas en un número de 7 días llamados días clínicos. La red de Petri de cada día clínico tiene un lugar de entrada (lugar sin ninguna transición de entrada) que corresponde al inicio del día clínico y un conjunto de lugares finales (sin ninguna transición de salida) que modelan la finalización del día clínico. El modelo global de la vía clínica se obtiene por fusión de lugares, uno de los lugares finales del día clínico anterior se fusiona con el lugar que modela el inicio del siguiente día. La visión modular de las vías clínicas nos permite estudiar distintas propiedades del sistema de salud. Por ejemplo, en la sección 5.1, se utilizan días clínicos distintos que se ejecutan en paralelo (correspondientes a distintos pacientes que se encuentran en fases distintos de tratamiento) que nos permite estimar el número de óptimo de recursos. En la sección 5.2. se utilizan los días clínicos ejecutándose secuencial pudiéndose estimar el tiempo total para seguir una vía clínica.

5.1 - Número óptimo de médicos

En éste estudio se considera un escenario en el cual en el servicio de traumatología se opera de las dos vías clínicas modeladas (artroplastia de cadera y de rodilla) solo 3 días a la semana (lunes, miércoles y viernes). Sabiendo que el servicio tiene disponibles dos quirófanos que se pueden utilizar diario durante 8 horas y la duración de las dos operaciones quirúrgicas es alrededor de 2 horas, consideramos que solo 6 pacientes ingresan los días anteriores a la operación. Esto es porque los médicos no solo tienen que operar a los nuevos pacientes ingresados, sino que además deben tratar a los pacientes operados los días anteriores que están siguiendo las vías clínicas. De estos 6 pacientes, asumimos que 3 se operarán de artroplastia de cadera y los otros 3 de artroplastia de rodilla. De igual forma, para cada operación quirúrgica, es necesaria la presencia de tres médicos durante toda la intervención. Utilizando la red de Petri de recursos y la herramienta TimeNET queremos obtener por simulación el número óptimo de médicos necesario para acabar las actividades de todos los pacientes. Se comprobará también que solo un enfermero y un celador son suficientes.

Como se ha presentado en las secciones anteriores, las dos vías clínicas consisten en una secuencia de 7 días clínicos: el día 0 es el día de ingreso, día 1 corresponde al día de la intervención quirúrgica, y los 4 días siguientes corresponden a los días postoperatorios y el último día final de la vía clínica 'día6', en el que el médico da el alta al paciente, o si no lo ve recuperado lo mantiene ingresado. Las vías clínicas y las redes de Petri que se obtienen por transformación se presentan en el Anexo 1.

Por otro lado, Tabla 1 presenta la evolución de los pacientes ingresados en el servicio quirúrgico durante una semana. Los días de operación (lunes, miércoles y viernes) están marcados con un círculo naranja en la tabla 1. Se puede observar que hay un número de dieciocho pacientes ingresados cada día de la semana con estas dos patologías. Por ejemplo, el lunes se operan los seis pacientes ingresados el domingo, se atienden a los seis pacientes del 'día6' operados el miércoles de la semana pasada y se atienden a los seis pacientes del 'día4' que se operaron el viernes de la semana pasada.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Día vías	6	0	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5	6	0
	4	5	6	0	1	2	3

Tabla 1: Calendario semanal de las vías clínicas

Para las simulaciones de este estudio, se considera el día de lunes. Para modelar y simular con una red de Petri, se utiliza una estructura parecida a la presentada en la figura 14. El lugar 'pacientes' contiene un número de 3 marcas y al disparar la transición de salida, se consume una marca del lugar 'Pacientes' y se genera una marca en cada lugar de inicio de los días clínicos correspondiente a lunes. En particular, el disparo de la transición modela el inicio de los tratamientos de un paciente que está en el día 1 de la vía de artroplastia de cadera, otro paciente que está en el día 4 y otro paciente que está en el día 6 de la misma vía de artroplastia de cadera. También, el disparo de la transición modela el inicio de los días 1, 4 y 6 de la vía de artroplastia de rodilla.

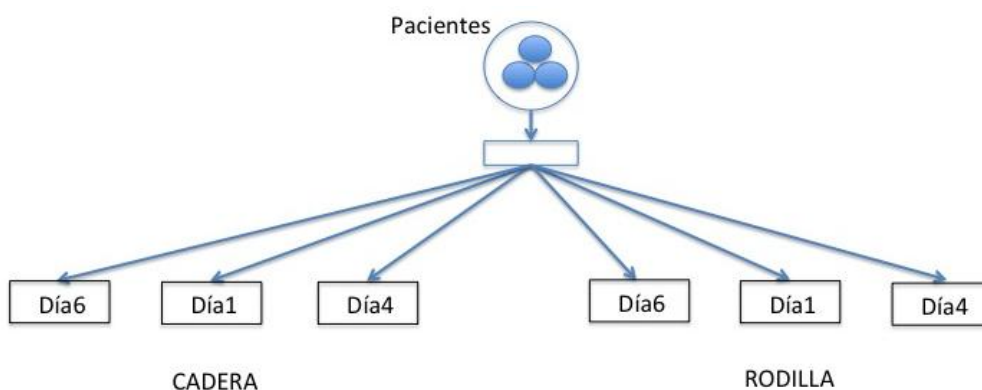


Figura 18: Esquema de la red de Petri correspondiente al día de lunes. No se ha representado la información de los recursos que se comparten entre todos los días

Utilizando la red de Petri presentada en la fig. 18, se hacen simulaciones del régimen transitorio con un intervalo de confianza del 98%. En particular, nos interesa el número de marcas después de 480 minutos en algunos lugares (los lugares que modelan las últimas actividades de cada día clínico o de los lugares que modelan los recursos humanos). Por otro lado, considerando el número total de pacientes que inician los días clínicos se puede obtener la probabilidad de finalización de todas las actividades en 8 horas.

Lunes									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Vía Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	0,992	0,992	480
						E{Enfermeros}	0,9065	0,9065	
						E{Medicos}	0,35417	0,11805667	
			cadera	final día 1	Operación	E{#p326}	1,47	0,49	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p582}	2,97	0,99	
				final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,926	0,97533333	
			rodilla	final día 1	Operación	E{#p986}	1,479	0,493	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p1342}	2,37433	0,79144333	
				final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,995	0,9983	

Tabla 2: Simulaciones asumiendo un número de 3 médicos

En la Tabla 2, se presentan las simulaciones del régimen transitorio utilizando la red de Petri de recursos para 480 minutos y un número de tres médicos disponibles. Se observa que después de 480 minutos, el número de marcas en el lugar 'Médicos' es de 0,35417. Como este lugar modela el número de médicos disponibles, el valor que se obtiene después de 480 minutos significa que de media: 3 (disponibles inicialmente) - 0,35417 (que están libres después de 480 minutos) = 2,64583 médicos siguen acabando algunas tareas. La probabilidad de acabar todas las actividades en 480 minutos por los médicos es de: $0,35417/3 = 0,11$ (11%). Evidentemente, esto significa que solo tres médicos no son suficientes para acabar todas las tareas del día de lunes. Esta conclusión es más o menos lógica siendo necesarios tres médicos para cada intervención quirúrgica y la duración media de las intervenciones es de dos horas.

Mirando los pacientes, se observa que solo la mitad de ellos se operan. Por ejemplo, en caso de artroplastia de cadera, de los 3 pacientes del día clínica 1 (día de la intervención) solo 1,47 acaban siendo operados (el número medio de marcas en el lugar, $E\{p326\}$ es igual a 1,47). Esto significa una probabilidad de $1,47/3=0,49$ de que se operen todos en 8 horas. En caso de artroplastia de rodilla, se obtiene una probabilidad de 0,493.

Lunes									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Vía Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		$E\{Auxiliar\}$	0,999	0,999	480
			cadera	final día 1	Operación	$E\{p326\}$	2,593	0,86433333	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	$E\{p582\}$	2,998	0,99933333	
				final día 6	final día 6	$E\{p662\}+E\{p675\}$	2,997	0,999	
			rodilla	final día 1	Operación	$E\{p986\}$	2,59	0,86333333	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	$E\{p1342\}$	2,88138	0,96046	
final día 6	final día 6	$E\{p662\}+E\{p675\}$		2,92667	0,9756				

Tabla 3: Simulaciones asumiendo un número de 6 médicos

Asumiendo un número de médicos igual a 6, en la tabla 3 se observa que las actividades de intervención quirúrgica (día 1 de las dos vías clínicas) se acaban con una probabilidad de 86% en 8 horas. Por otro lado, se observa que solo 4 de los 6 médicos quedan disponibles después de 8 horas.

Lunes									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Vía Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		$E\{Auxiliar\}$	0,999	0,999	480
			cadera	final día 1	Operación	$E\{p326\}$	2,82867	0,94289	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	$E\{p582\}$	2,999	0,99966667	
				final día 6	final día 6	$E\{p662\}+E\{p675\}$	2,99111	0,99703667	
			rodilla	final día 1	Operación	$E\{p986\}$	2,81706	0,93902	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	$E\{p1342\}$	2,97381	0,99127	
final día 6	final día 6	$E\{p662\}+E\{p675\}$		2,945	0,9817				

Tabla 4: Simulaciones asumiendo un número de 9 médicos

Asumiendo un número de médicos igual a 9, en la tabla 4 se observa que todas las actividades de todos los pacientes se acaban con alta probabilidad después de 8 horas (asimismo los recursos quedan disponibles).

Médicos	Probabilidad
3	0,118
4	0,364
5	0,496
6	0,674
7	0,755
8	0,797
9	0,898
10	0,908

Tabla 5: Probabilidades de que un médico termine sus actividades del día de lunes

En la tabla 5 se presentan las probabilidades de finalización de las actividades de los médicos después de 480 minutos para distintos números de médicos disponibles. La conclusión es que si se quiere operar 3 días a la semana, en cada día de operación que se operen tres pacientes de artroplastia de cadera y tres de artroplastia de rodilla, harían falta 9 médicos en el servicio hospitalario. En este caso, con una probabilidad de 90% pueden ser vistos todos los pacientes durante la jornada laboral de los médicos especialistas. Los resultados completos de las simulaciones (en las mismas condiciones de simulación y asumiendo 3 médicos disponibles) de los otros días de la semana se presentan en el Anexo 3.

5.2 - Tiempo medio de una vía clínica

El estudio de esta sección tiene como objetivo obtener el tiempo de ciclo de las vías clínicas variando el número de recursos disponible y el número de pacientes. Para ello se toma primero una vía clínica (de artroplastia de cadera) y luego las dos (de artroplastia de cadera y artroplastia de rodilla) y se ejecutan en paralelo. Cada vía clínica esta compuesta por sus 7 días clínicos que se ejecutan en serie (el final de un día clínico con el principio del siguiente día clínico) en orden cronológico empezando por el día0 y terminando en el día6. Una representación esquemática de las dos vías clínicas se presenta en la figura 19.

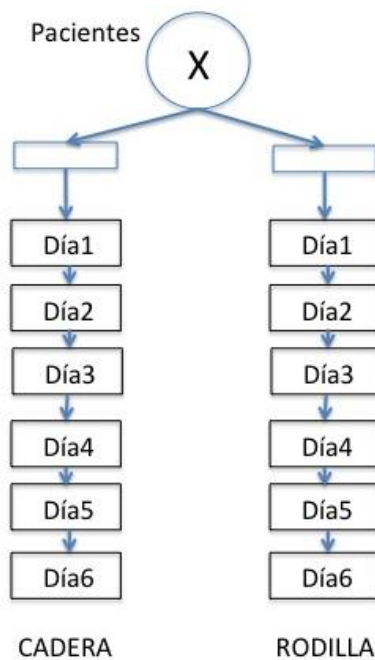


Figura 19: Simulación secuencial de los días clínicos

Se utilizará TimeNET ejecutándose una simulación de régimen permanente de la red de Petri de recursos en lazo cerrado (uniendo mediante una transición cada lugar final que no modela finalización de un día clínico (no ingresa, no es dado de alta) con el lugar inicial). Para obtener el tiempo de ciclo se calcula primero la velocidad de disparo de una transición que es igual a la inversa de la media de la función de probabilidad asignada. La velocidad se multiplica con el número medio de marcas en su único lugar de entrada (asumiendo que es único). Haciendo la inversa de este número se tiene el tiempo medio entre dos disparos consecutivos de la transición y si la transición es una de las últimas de la secuencia es exactamente igual al tiempo de ciclo. De donde, el tiempo de ciclo T es:

$$T = \frac{1}{E(\# p640) \cdot \frac{1}{15}}$$

En el primer caso, para la vía clínica de artroplastia de cadera, las simulaciones se presentan en la tabla 6. Los parámetros de entradas correspondientes a las primeras 4 columnas son:

- A – Auxiliar
- E – Enfermero
- M – Médicos
- P – Pacientes

La quinta columna 'FinalCadera' representa al *throughput* (número de disparos por unidad de tiempo) de una de las últimas transiciones temporizadas. Las columnas 'Auxiliar', 'Enfermero' y 'Médico' representan el número medio de marcas en los lugares que modelan los recursos (en particular el número medio de recursos no utilizados). Por fin, la última columna 'Tiempo de ciclo' corresponde al tiempo de ciclo.

A	E	M	P	FinalCadera		Auxiliar	Enfermero	Medico		Tiempo de ciclo
1	1	3	1	0,0334931	Pacientes que finalizan	0,8660864	0,8743983	1,922843	Recursos disponible	447,8534385
1	1	3	5	0,0649385		0,6136606	0,6186453	0,5342931		230,9877807
1	1	3	10	0,06871495		0,6001429	0,5944626	0,321851		218,293108
1	1	3	15	0,06654457		0,5755868	0,5745897	0,3159277		225,4128323
1	1	3	20	0,06961991		0,6187064	0,6061306	0,330448		215,4556075
1	1	5	1	0,03085195	Pacientes que finalizan	0,8020651	0,811477	3,815867	Recursos disponible	486,1929311
1	1	5	5	0,08472115		0,4793421	0,4804168	1,644232		177,051421
1	1	5	10	0,09851814		0,4225774	0,4363598	1,200817		152,2562241
1	1	5	15	0,1005337		0,4060944	0,4060944	1,121069		149,2036999
1	1	5	20	0,09642976		0,3865858	0,3968094	1,110325		155,5536382
1	1	10	1	0,03089206	Pacientes que finalizan	0,8028034	0,8109898	8,929789	Recursos disponible	485,5616621
1	1	10	5	0,1050164		0,324674	0,3199063	5,721799		142,8348334
1	1	10	10	0,1352953		0,1375142	0,1344867	4,340149		110,8685963
1	1	10	15	0,1463774		0,1020337	0,0981104	4,093784		102,4748356
1	1	10	20	0,1479338		0,0770627	0,0656882	4,479294		101,3967058
A	E	M	P	FinalCadera		Auxiliar	Enfermero	Medico		Tiempo de ciclo
2	1	3	1	0,03036215	Pacientes que finalizan	1,805988	0,7982201	1,7982201	Recursos disponible	494,0361602
2	1	3	5	0,06718873		1,701936	0,6273526	0,4687316		223,2517269
2	1	3	10	0,06889912		1,618802	0,5843729	0,3241643		217,7096021
2	1	3	15	0,07336486		1,696213	0,6177868	0,3318657		204,4575564
2	1	3	20	0,0658751		1,69159	0,582825	0,322232		227,7036392
2	1	5	1	0,03150146	Pacientes que finalizan	1,845144	0,8273986	3,876373	Recursos disponible	476,1684062
2	1	5	5	0,08485562		1,527736	0,4617565	1,521895		176,7708491
2	1	5	10	0,09009228		1,416349	0,3896088	1,113297		166,4959528
2	1	5	15	0,0945354		1,422483	0,3946309	1,086163		158,6707202
2	1	5	20	0,09757151		1,438661	0,404384	1,110941		153,7334003
2	1	10	1	0,0307567	Pacientes que finalizan	1,80799	0,8027996	8,847418	Recursos disponible	487,6986153
2	1	10	5	0,1182917		1,26283	0,2449392	5,059084		126,8051774
2	1	10	10	0,2098348		1,166425	0,0599559	4,099291		71,48480614
2	1	10	15	0,1638947		1,033039	0,0141622	3,587113		91,52217857
2	1	10	20	0,1657519		1,01043	0,0038393	3,607213		90,49670019
A	E	M	P	FinalCadera		Auxiliar	Enfermero	Medico		Tiempo de ciclo
2	2	3	1	0,03010741	Pacientes que finalizan	1,799505	1,818521	1,761655	Recursos disponible	498,2162199
2	2	3	5	0,06486182		1,597899	1,64726	0,3681975		231,2608558
2	2	3	10	0,06481507		1,586699	1,599012	0,328733		231,4276603
2	2	3	15	0,0652788		1,597511	1,608861	0,3224795		229,7836357
2	2	3	20	0,06471452		1,600544	1,612173	0,3186498		231,7872403
2	2	5	1	0,03040401	Pacientes que finalizan	1,80398	1,813087	3,76649	Recursos disponible	493,3559751
2	2	5	5	0,0970252		1,510075	1,526745	1,346565		154,5990114
2	2	5	10	0,09655753		1,418181	1,414132	1,088307		155,3478015
2	2	5	15	0,09788064		1,410296	1,413524	1,075584		153,2478741
2	2	5	20	0,09275845		1,406186	1,423472	1,092453		161,7103347
2	2	10	1	0,03147108	Pacientes que finalizan	1,84397	1,856913	9,024692	Recursos disponible	476,6280661
2	2	10	5	0,1484295		1,155659	1,137454	4,2449		101,0580781
2	2	10	10	0,2036289		0,7108138	0,7184349	1,466483		73,66341418
2	2	10	15	0,2592159		0,6057378	0,6282843	0,7457134		57,86682067
2	2	10	20	0,2383161		0,5634818	0,5445507	0,4432519		62,9416141

Tabla 6: Tiempo de ciclo para vía clínica Cadera

Se puede observar que en caso de un paciente el tiempo de ciclo es mayor. Aumentando el número de pacientes, este tiempo es más pequeño porque se pueden tratar pacientes en paralelo. También se puede observar que aumentando el número de pacientes llega un punto en cual el recurso médico es que restringe el tiempo de ciclo pero siguiendo aumentando el recurso más restrictivo cambia a enfermero.

A continuación se consideran las dos vías clínicas asumiendo distintas probabilidades de reparto de los pacientes entre las dos vías clínicas. Se pretende analizar el mismo indicador que es el tiempo de ciclo.

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					1078,515962	1061,04098
30-70	%	1	1	10	1911,370514	765,3701636
70-30					696,3254904	1802,11655

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					545,962191	527,7033716
30-70	%	1	1	10	950,8336593	372,9936671
70-30					341,6773213	862,62521

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					477,8013493	481,325532
30-70	%	1	1	10	847,5586638	326,2381608
70-30					301,5155377	776,2576927

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					475,6889641	453,7320367
30-70	%	1	1	10	801,1754847	306,0338865
70-30					294,506222	780,1906474

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					457,2692551	449,7680996
30-70	%	1	1	10	798,1088014	313,4162201
70-30					302,2249194	781,9472363

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					1133,811701	1128,20806
30-70	%	1	1	10	1848,532936	745,5123882
70-30					654,4876692	1680,543851

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					333,676798	330,8320957
30-70	%	1	1	10	584,8755853	240,1389732
70-30					209,8712524	568,5093571

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					263,3683122	248,5184984
30-70	%	1	1	10	538,0218229	205,8873346
70-30					165,2953398	423,1994556

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					159,2005838	269,9741743
30-70	%	1	1	10	553,890806	203,6048925
70-30					156,8402749	401,8763876

Reparto de pacientes	A	E	M	P	Cadera	Rodilla
50-50					265,5548299	260,5258976
30-70	%	1	1	10	516,6269495	195,2372269
70-30					161,138177	448,6296607

Tabla 7: Tiempos de ciclo en las dos vías clínicas para los distintos indicadores

En la tabla 7 la columna de color lila contiene las probabilidades de la elección comentada, la siguiente columna el número de recursos disponibles (A: auxiliar, E: enfermero/a, M: médicos y P: pacientes). Se observa que para un reparto de paciente equitativo el tiempo cíclico es parecido para finalizar cualquiera de las dos vías clínicas, para una probabilidad de elección de 30% en cadera el tiempo para atender a un paciente aumenta drásticamente y para una probabilidad de 70% ocurre a la inversa (disminuye el tiempo para atender la misma cantidad de pacientes).

6 - RdP coloreas vs RdP

Los modelos que se obtienen al aplicar las transformaciones modelo-a-modelo desde los modelos UML son redes de Petri coloreadas. Estas redes de Petri contiene toda la información del sistema de salud pero su análisis es muy complicada. Normalmente las redes coloreadas se pueden utilizar para simulación y análisis basado en la exploración del espacio de estados de la red. Por eso, se han propuesto relajaciones a redes de Petri sin colores. Para una determinada aproximación es importante de estudiar la diferencias entre distintos indicadores por simulación. En esta sección se simula la red de Petri coloreada y la red de Petri y se compara el mismo indicador para ver las diferencias.

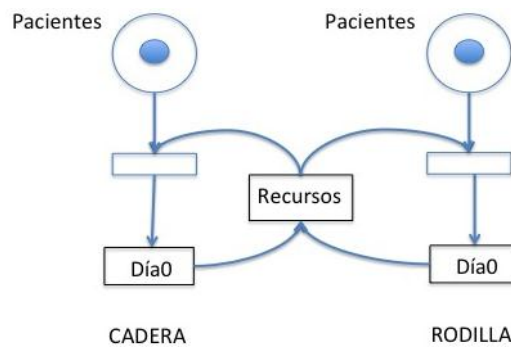


Figura 20: Esquema de la red de Petri

La fig. 20 es la primera que se va a comparar, y esta conformada por el día0 de cadera con un paciente y el día0 de rodilla con un paciente, que se ejecutan en paralelo y ambos días comparten el mismo número de recursos. El conjunto de los dos días con los recursos y los pacientes que tienen ingresados para su día forman el sistema del Domingo 6.

Domingo 6								
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo
HEAT Monitor	Simulación transitoria	Red de recursos	recursos humanos		E{Auxiliar}	1	1	480
			cadera	final día 0	E{#p118}+E{#p219}	1	1	
			rodilla	final día 0	E{#p327}+E{#p426}	1	1	

Tabla 8: RdP, ingresan un paciente de cadera y otro de rodilla el domingo

Domingo 6								
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo
HEAT Monitor	Simulación transitoria	Red coloreada	recursos humanos		E{Auxiliar}	1	1	480
					E{Enfermeros}	1	1	
					E{Medicos}	3	1	
					Autotransfusión	2	1	
		cadera	final día 0	E{#p118}+E{#p219}	1	1		
		rodilla	final día 0	E{#p327}+E{#p426}	1	1		

Tabla 9: RdP coloreada, ingresan un paciente de cadera y otro de rodilla el domingo

Se ha generado una red coloreada a partir de la RdP del Domingo 6 que se obtuvo con HEAT-Monitor (ver en anexo 4) que sigue el esquema de la figura 20, y los resultados (tabla 9) son muy similares a los obtenidos en la RdP (tabla 8). Los pacientes son atendidos por 3 médicos, 1 auxiliar y un enfermero/a y al finalizar la simulación el 100% de ellos está disponible.

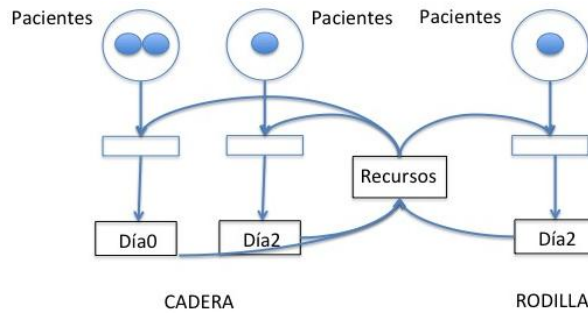


Figura 21: Esquema de la red de Petri del Martes 8

La fig. 21 consiste en el día0 de cadera con dos paciente, el día 2 de cadera con un paciente y el día2 de rodilla con un paciente, que se ejecutan en paralelo y ambos días comparten el mismo número de recursos. El conjunto de los 3 días con los recursos y los pacientes que tienen ingresados para su día forman el sistema del Martes 8.

Martes 8									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
HEAT Monitor	Simulación transitoria	recursos dias	recursos humanos			E{Auxiliar}	1	1	480
						E{Enfermeros}	1	1	
						E{Medicos}	3	1	
			cadera	final día 0		E{#p118}+E{#p219}	2	1	
	final día 2	Primer día postoperatorio	E{#p297}	1	1				
	final día 2	Primer día postoperatorio	E{#p375}	1	1				

Tabla 10: RdP, ingresan un paciente de cadera y otro de rodilla el martes

Martes 8									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
HEAT Monitor	Simulación transitoria	Red coloreada	recursos humanos			E{Auxiliar}	1	1	480
						E{Enfermeros}	1	1	
						E{Medicos}	3	1	
						Autotransfusión	2	1	
cadera	final día 0		E{#p118}+E{#p219}	1,9899993	0,99499965				
	final día 2	Primer día postoperatorio	E{#p297}	1	1				
rodilla	final día 2	Primer día postoperatorio	E{#p375}	1	1				

Tabla 11: RdP coloreada, ingresan un paciente de cadera y otro de rodilla el martes

También se ha generado una red coloreada a partir de la RdP del Martes 8 que se obtuvo con HEAT-Monitor (ver en anexo 4) que sigue el esquema de la figura 21, y los resultados (tabla 11) son muy similares a los de la RdP (tabla 10). Los pacientes son atendidos por 3 médicos, 1 auxiliar y un enfermero/a y al finalizar la simulación el 100% de ellos están disponibles.

Estas son las únicas redes coloreadas que se han podido simular en TimeNET que contienen autotransfusión (es decir redes que utilizan el historial clínico). Debido al tamaño de las otras RdP coloreadas, TimeNET no ha sido capaz de simularlas.

7 - Posibles mejoras a implementar

Este proyecto además de realizar el estudio de las vías clínicas, se encarga de la búsqueda de posibles errores en las herramientas que se están implementando en la universidad de Zaragoza por nuestros compañeros y también consiste en la aportación de posibles mejoras.

En el HEAT-Designer a la hora de transformar el diagrama UML a Petri por fechas, solo permite la elección de los días uno a uno. Para acelerar el proceso y que sea más llevadero, una posible mejora es que se pueda hacer la selección de varios días a la vez para poderlos transformar todos en una vez. Se ha comentado con Emanuele Alberto que sigue el trabajo de Luis Parrilla (los compañeros que desarrollan las herramientas de HEAT) de poder elegir transformar para un día o una semana completa que sería el ingreso completo para un paciente, para que de este modo tenga un límite y no saturar los recursos del ordenador en el caso de seleccionar muchos días.

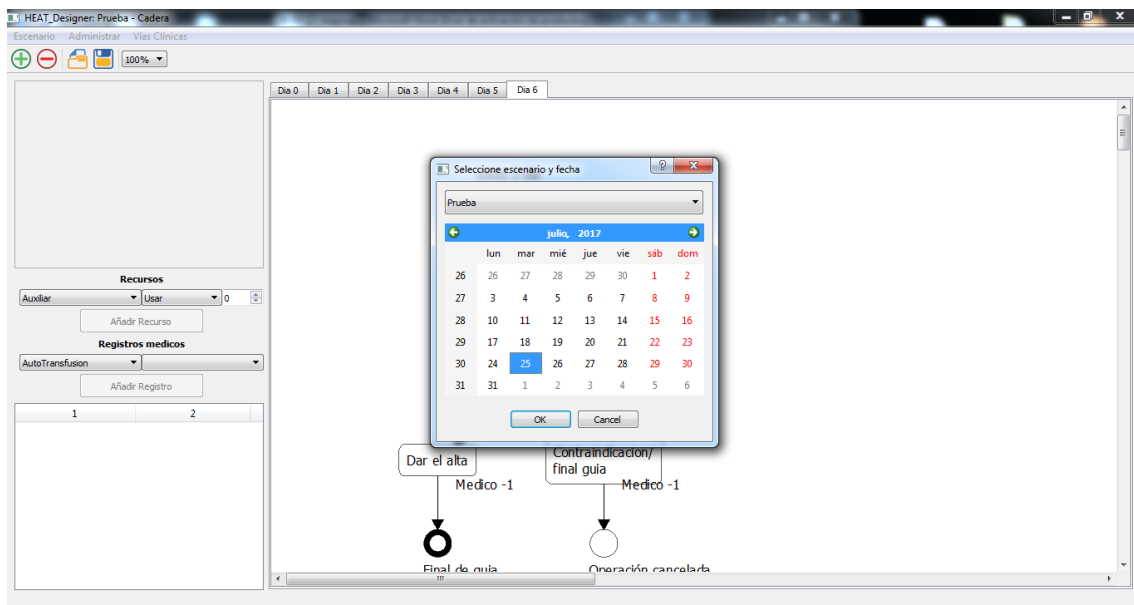


Figura 22: HEAT-Designer (Transformar UML a redes de Petri por fechas)

En HEAT-Designer hay una mejora que ya se llevó a cabo. Había un menú llamado médicos y su función era otra a la que daba a entender, así que se eliminó porque la opción médicos ya se encontraba en el menú recurso y esta sobraba.

Un problema que se ha encontrado HEAT-Designer es que cuando se crea o se abre un Escenario y seguidamente creamos una vía clínica, estos no quedan enlazados. La mejora que se propone es que una vez estés en un Escenario las vías clínicas creadas en esta queden ya enlazadas.

Otro problema es que hay que reiniciar el programa una vez creado un recurso para poder hacer uso de él en el diagrama. Para mejorar el programa, una vez creado el recurso que lo incluya directamente en el interfaz sin necesidad de reiniciar el programa (ya solucionado).

Una mejora propuesta que se ha llevado a cabo; para eliminar un recurso se seleccionaba la flecha donde se encuentra el recurso (en el diagrama de UML) y añadimos 0 recursos. Ahora una vez seleccionada la fecha se elige borrar y añadir ese recurso para eliminarlo. De este modo evitaremos posibles malentendidos.

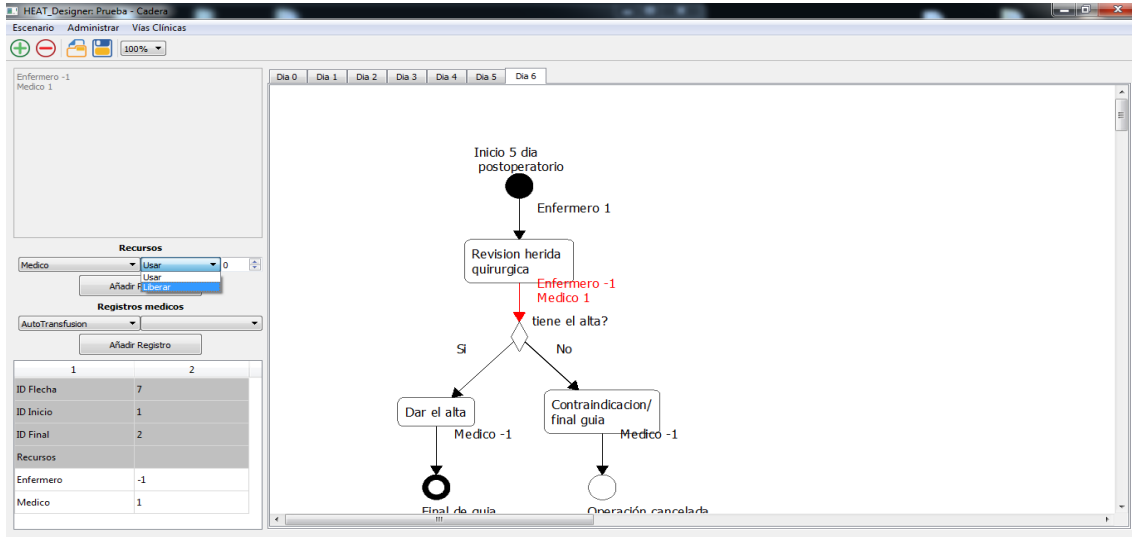


Figura 23: HEAT-Designer (quitar recursos)

Otro fallo detectado es que cuando borras un día se borran de dos en dos (ya solucionado).

Más mejoras a implementar; poner un límite de pacientes en los quirófanos para que en el caso de que entren más de los que se puedan operar, se repartan en los siguientes días disponibles. Para el HEAT-Monitor.

8 - Conclusiones

Este trabajo es la continuación del proyecto de José Benigno García Barreto y las aportaciones que se han realizado a esta trabajo son:

- Colaboración en la herramienta HEAT.
- Estudio del número óptimo de médicos.
- Estudio de las camas libres.
- Comparar las redes de recursos con las coloreadas.
- Modelado de la vía clínica Cadera para CPN Tools.

Los objetivos propuestos se han cumplido satisfactoriamente pues se ha logrado realizar un análisis realista que refleje la forma de trabajo actual del servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU. También se ha encontrado el número óptimo de los recursos.

La experiencia conseguida con este trabajo ha sido gracias a Cristian Mahulea, Jorge Albareda, Luis Parrilla y Emanuele Alberto Vitolo, a quienes les agradezco el tiempo que han dedicado a ayudarme para realizar este trabajo.

El punto de vista profesional de este trabajo es la importancia de saber trabajar con equipos de personas de diferentes ramas y saber entenderse, la complejidad de las herramientas que puedes llegar a utilizar y además que no es tan fácil la obtención de resultados y cuesta mucho tiempo la obtención de los resultados correctos.

Después de realizar tantos estudios aproximados a la realidad, una vez se implemente la herramienta HEAT en el Hospital Clínico "Lozano Blesa", se podrán repetir dichos estudios con datos reales y se podrá empezar a utilizar como mejora del servicio clínico y de ayuda a los médicos usándolo como un seguimiento de las actividades a realizar.

A pesar de las dificultades que he podido encontrar en este trabajo y el tiempo dedicado, he aprendido muchas cosas en el ámbito de la ingeniería así como en el ámbito de la medicina.

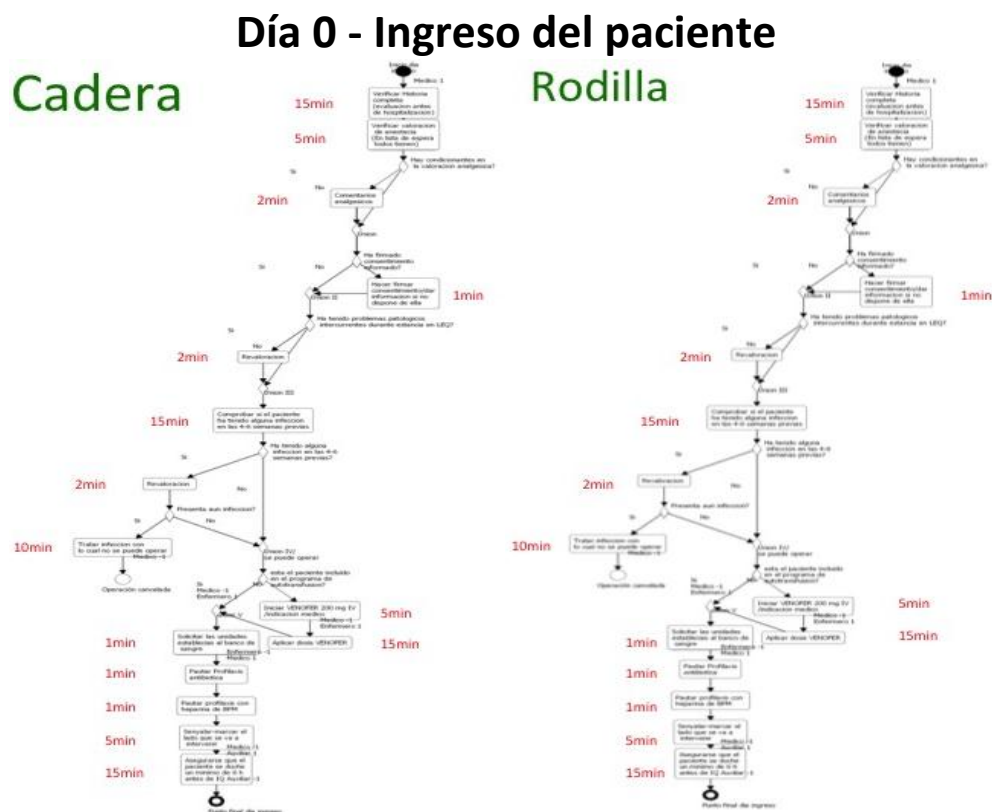
Se pueden obtener los modelos generados en la herramienta CPN Tools desde el siguiente enlace: <https://webdiis.unizar.es/GISED/projects/M2H/modelos/modelosCPN.zip>

9 - Bibliografía

- [1] Luis Parrilla Bel, Manual de la herramienta HEAT: Healthcare Efficiency and Effectiveness Analysis Tool, Universidad de Zaragoza, 2016.
- [2] (ManualTimeNET) <http://www2.tu-ilmenau.de/sse/file/TimeNET/Documentation/TimeNET-UserManual40.pdf>
- [3] M. Field and K. Lohr, Guidelines for Clinical Practice: from Development to Use . Washington, DC: National Academy Press, 1992.
- [4] S. Bernardi, J. Albareda, J.M. Colom and C. Mahulea, "A model-based Approach for the Specification and Verification of Clinical Guidelines", In M2H: Workshop on Models and Methods for Hospital Management and Planning held in conjunction with ETFA'2014: 19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Barcelona, Spain, September 2014.
- [5] Proyecto CICYT (DPI2014-57252-R) <https://webdiis.unizar.es/GISED/projects/M2H/index.html>
- [6](TimeNET) <http://www.tu-ilmenau.de/sse/timenet/>
- [7](CPN Tools) <http://cpntools.org/documentation/start>
- (CMA) <http://www.hsl.es/es/default/pyv/cirugiamayor>
- (UR) <http://www.elmundo.es/elmundosalud/2012/04/16/noticias/1334593687.html>
- (C) <https://encolombia.com/medicina/guiasmed/jovenes/caracteristicasdeatencion2-3/>
- (Amb) <http://www.wordreference.com/definicion/ambulatorio>
- (UML vs Petri) <https://people.cs.pitt.edu/~chang/231/Time/PetriNet/11.htm>

Anexo 1. Vías clínicas modeladas en HSS

En este apartado se presentan los modelos UML/HSS de las dos vías clínicas consideradas en este proyecto: vía clínica de artroplastia de cadera y vía clínica de artroplastia de rodilla. Las dos vías clínicas consisten en una secuencia de 7 días clínicos, empezando con el día 0 del ingreso, día 1 de la intervención quirúrgica y el día 6 de la alta médica. Los diagramas se muestran en orden cronológico y las vías clínicas cadera y rodilla se muestran enfrentadas para los mismos días. De este modo a simple vista se ven las diferencias de una y otra. A la izquierda se encuentra la vía clínica de cadera y a la derecha la vía clínica de rodilla. Además, en rojo se observan los valores medios de los tiempos de cada actividad.

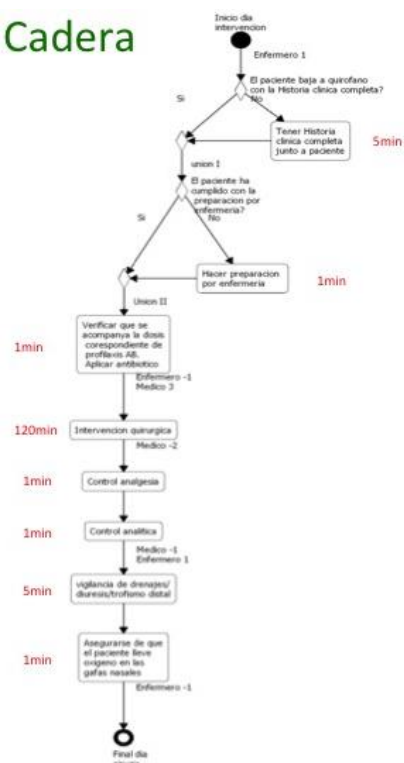


Día 0. Ingreso del paciente. Se realizan los siguientes pasos (para ambas los mismos):

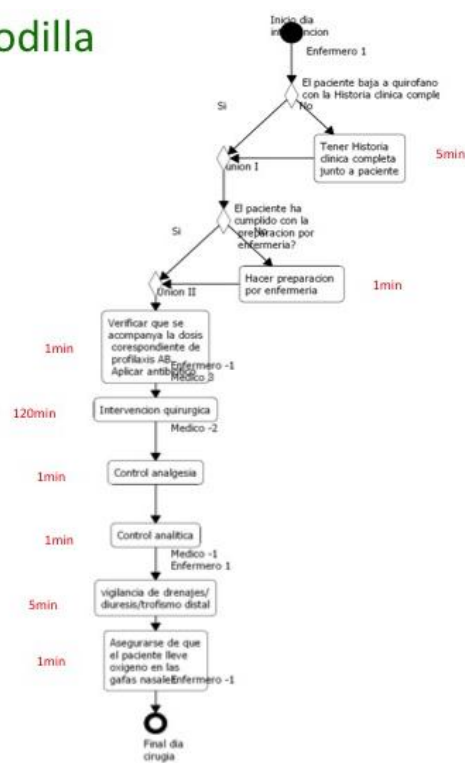
- Verificar documentación completa procedente de la consulta
- Verificar que ha sido valorado por Anestesia
- Verificar si tiene firmado el Consentimiento Informado
- Valorar la existencia de procesos patológicos intercurrentes durante su periodo de LEQ (incluidas nuevas alergias)
- Atención especial ante infecciones urinarias en las 4-6 semanas previas
- Realizar en su caso el estudio preoperatorio urgente
- Verificar si está incluido en programa de Autotransfusión
- En caso de no autotransfusión iniciar VENOFER 200 mg IV (que se repetirá a las 48 h.)
- Solicitar las Unidades establecidas al Banco de Sangre
- Pautar Profilaxis Antibiótica
- Pautar Profilaxis con Heparina de BPM
- Señalar-Marcar el lado que se va a intervenir (rotulador indeleble)
- El paciente se duchará un mínimo de 6 horas antes de la IQ

Día 1 - Operación de cadera

Cadera



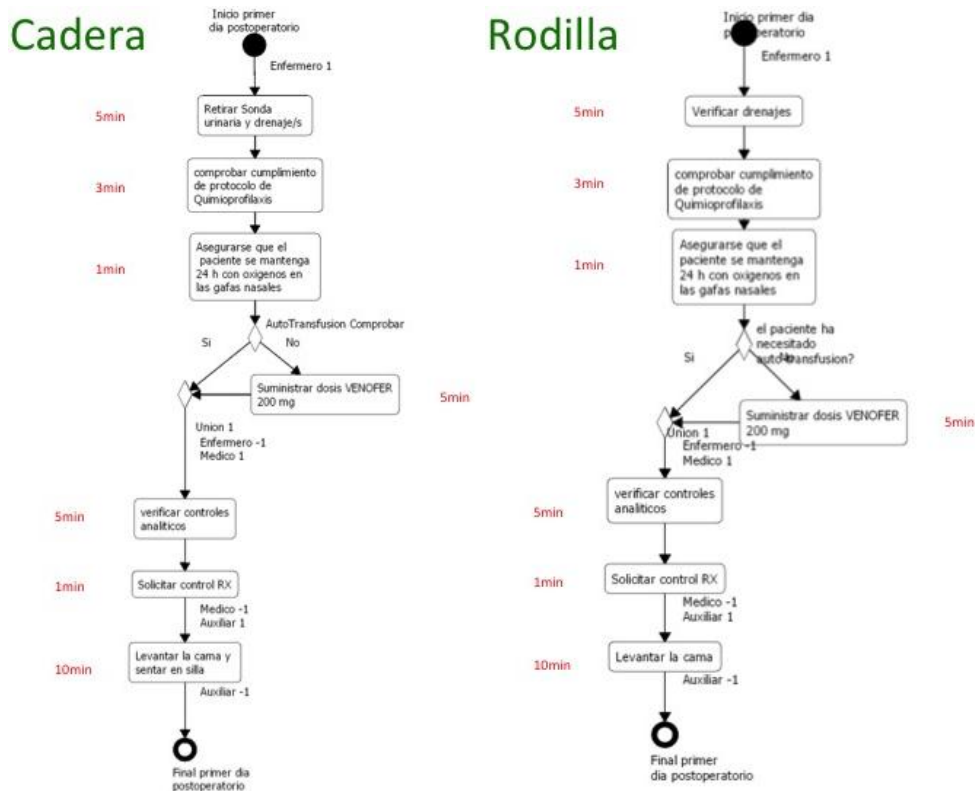
Rodilla



Día 1. La intervención quirúrgica. Se realizan los siguientes pasos:

- Comprobar que el paciente baje a quirófano con la H^a Clínica Completa
- Comprobar preparación por Enfermería antes de bajar a quirófano
- Verificar que se acompaña la dosis correspondiente de Profilaxis AB
- Comprobar la correcta identificación del paciente
- Postcirugía
- Control de Analgesia
- Control de Analítica
- Vigilancia de drenajes/diuresis/trofismo distal
- Asegurarse de que lleva oxígeno en gafas nasales

Día 2 - Primer día postoperatorio



Día 2. Primer día postoperatorio. En el que se realizan los siguientes pasos:

Para cadera

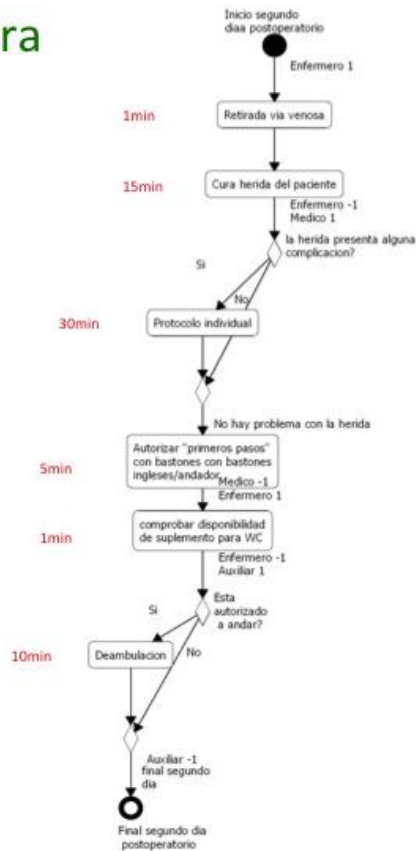
- Verificar controles analíticos
- Retirar Sonda Urinaria y Drenaje/s
- Comprobar cumplimiento de protocolo de Quimioprofilaxis
- Mantener 24 horas la oxigenoterapia en gafas nasales
- Levantar de la cama y sentar en silla alta (no sillón)
- Solicitar Rx de control
- 2a dosis de VENOFER 200 IV

Para rodilla

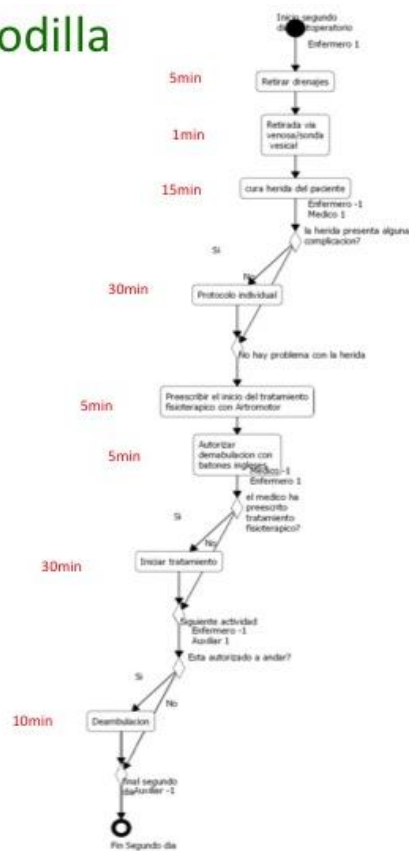
- Verificar drenajes y controles analíticos
- Comprobar cumplimiento de protocolo de Quimioprofilaxis
- Mantener 24 horas la oxigenoterapia en gafas nasales
- Levantar de la cama
- Solicitar Rx de control

Día 3 - Segundo día postoperatorio

Cadera



Rodilla



Día 3. Segundo día postoperatorio. En el que se realizan los siguientes pasos:

Para cadera

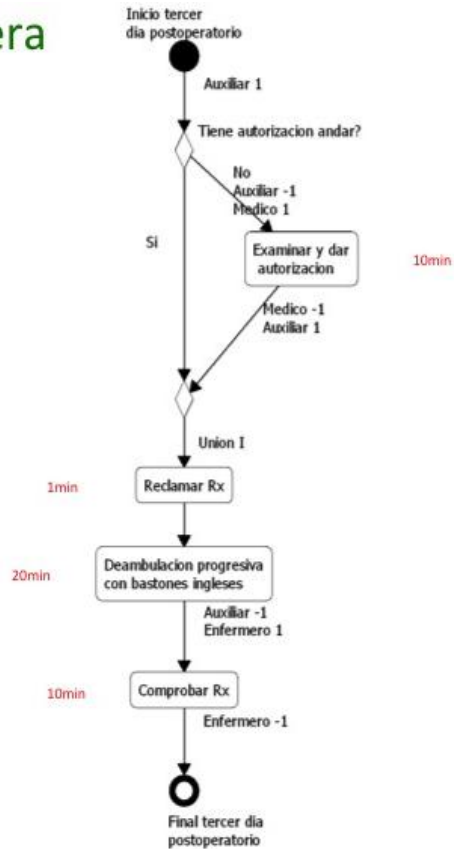
- Retirada de vía venosa
- Realizar revisión-cura de la herida
- Autorizar "primeros pasos" con bastones ingleses / andador
- Comprobar disponibilidad de suplemento para WC

Para rodilla

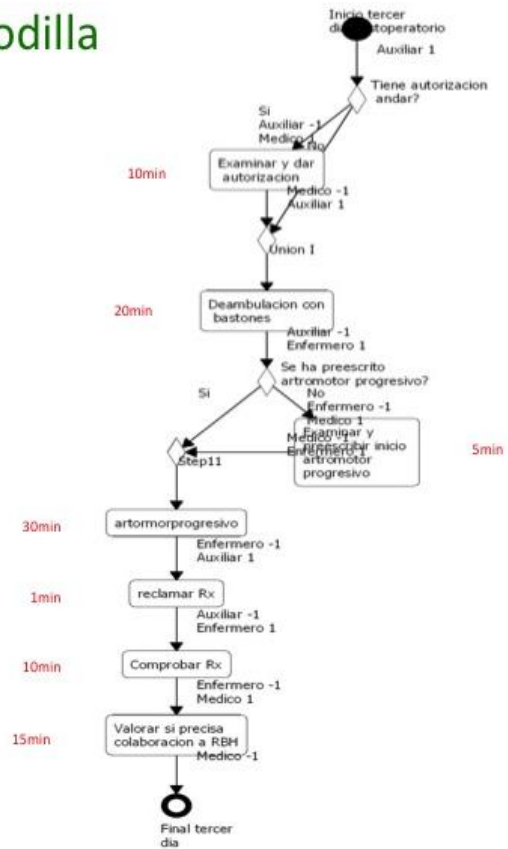
- Retirar drenajes
- Retirada de vía venosa
- Realizar revisión-cura de la herida
- Iniciar tratamiento fisioterápico con Artromotor
- Autorizar deambulación con bastones ingleses

Día 4 - Tercer día postoperatorio

Cadera



Rodilla



Día 4. Tercer día postoperatorio. En el que se realizan los siguientes pasos:

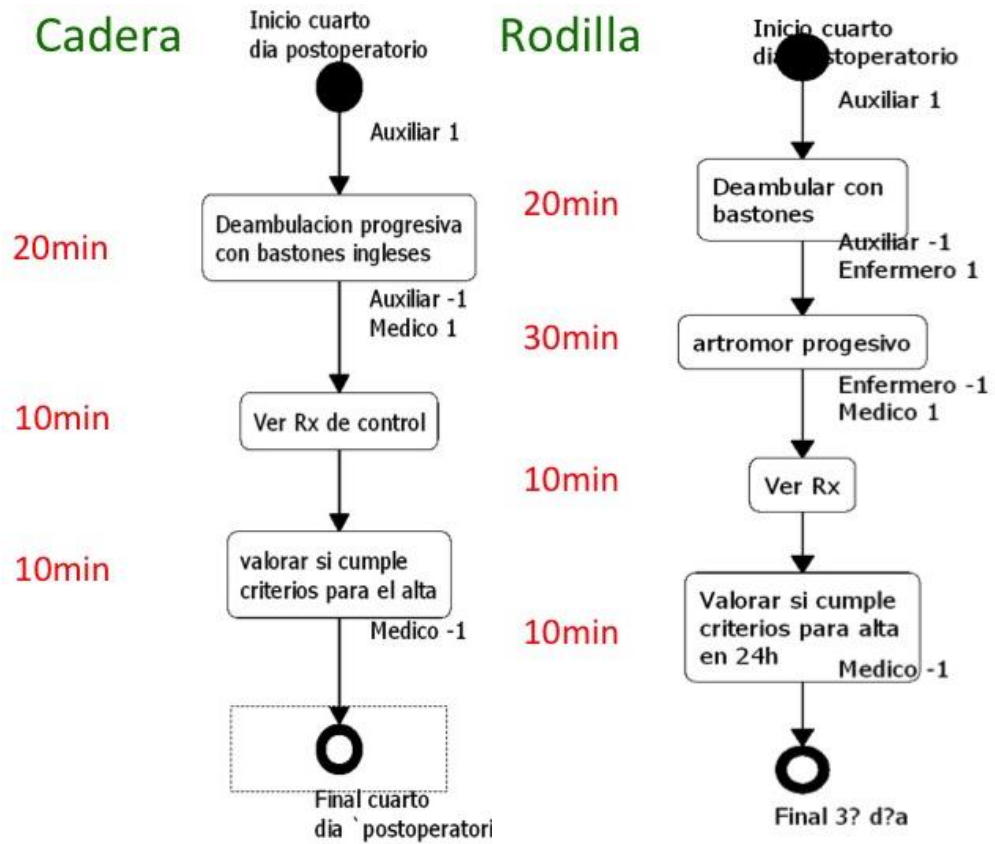
Para cadera

- Deambulación progresiva con bastones ingleses
- Comprobar / Reclamar Rx de control

Para rodilla

- Deambular con Bastones
- Artromotor progresivo
- Comprobar / Reclamar Rx de control
- Valorar si precisa colaboración a RHB

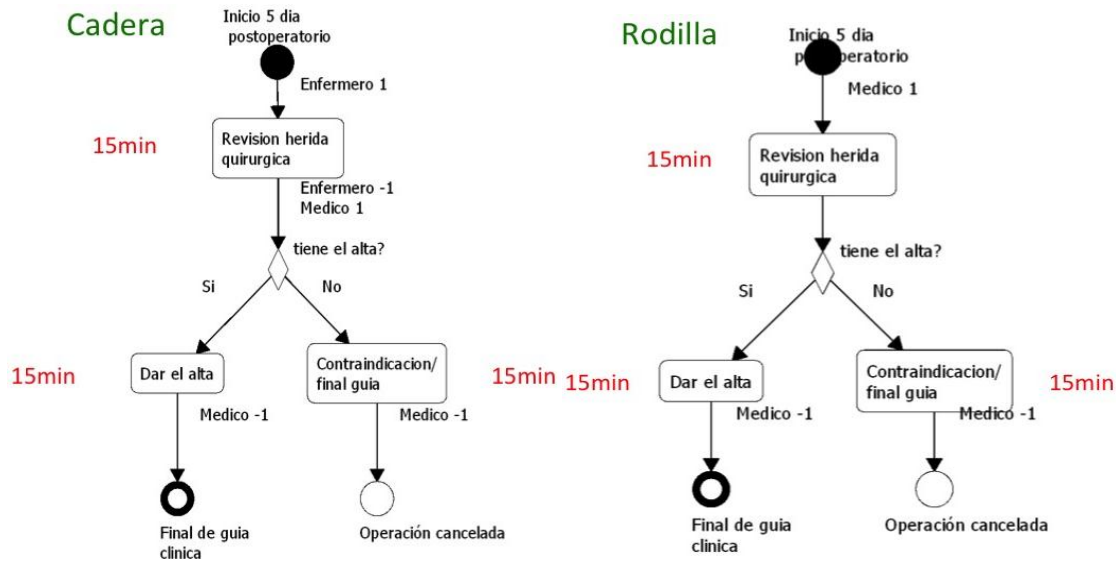
Día 5 - Cuarto día postoperatorio



Día 5. Cuarto día postoperatorio. En el que se realizan los siguientes:

- Además de lo correspondiente al día 4º
- Ver Rx de control
- Valorar si cumple criterios para alta en 24 horas

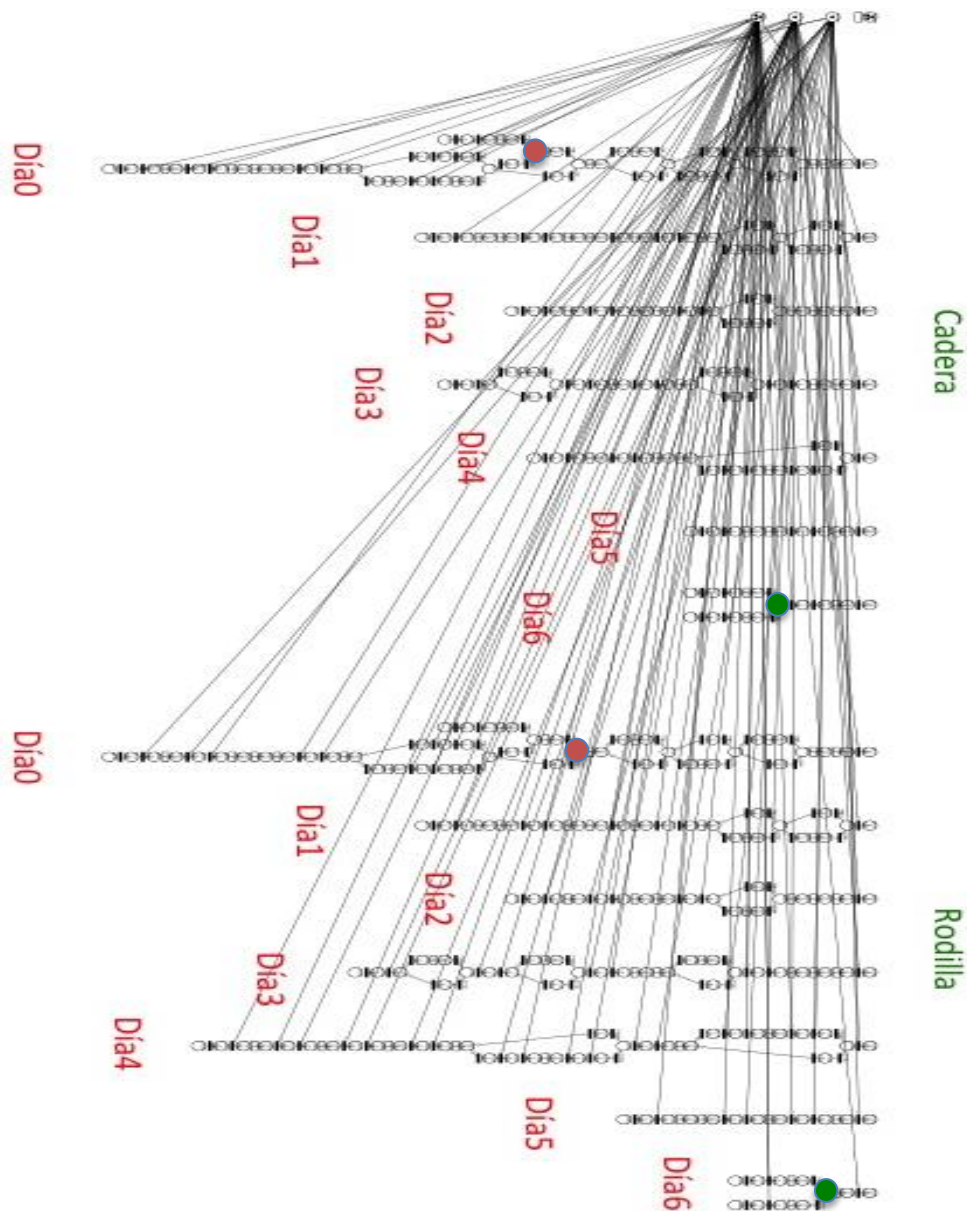
Día 6 - Fin de la vía clínica



Día 6. Final de la vía clínica. En el que se realizan los siguientes pasos (para ambas los mismos):

- Revisión herida quirúrgica
- Alta en Hospital (salvo contraindicación)
- Cita para retirar agrafes de sutura en las consultas externas /Centro de Salud
- Citación para revisión en consultas externas en el plazo de 4-6 semanas.

Redes de Petri de las dos vías clínicas



Como se comentó anteriormente para poder estudiar los sistemas hay que transformar los modelos HSS a redes Petri, mediante la transformación modelo-a-modelo que se puede hacer de forma automática desde HEAT-Designer. Se obtiene la red de Petri de la figura anterior (en rojo se indica la parte del día clínico al que pertenece. Además se han marcado los lugares con un círculo donde se encuentra elecciones: en rojo para un 5% de probabilidad de que un paciente no ingrese y en verde un 10% de que un paciente no sea dado de alta).

Anexo 2. Cuellos de botellas

En este anexo se analiza la atención de los pacientes desde el ingreso hasta que son dados de alta utilizando los modelos de redes de Petri obtenidos utilizando la vía clínica de artroplastia de cadera. Un paciente debe pasar por los 7 días clínicos para su tratamiento, además se pueden atender más pacientes que pueden ingresar el mismo día o en un día diferente y se atenderán todos los pacientes posibles en paralelo. Para este estudio en TimeNET se toma la red de Petri de recursos correspondiente a la vía clínica de artroplastia de cadera.

Se considera la organización semanal presentada en la tabla 1 del apartado “5.1 – Número óptimo de médicos”. Se observa que se opera de artroplastia de cadera solo los lunes, los miércoles y los viernes resultando en un número de 9 pacientes atendidos cada día. El número de pacientes a operar se ve limitado por la disponibilidad del quirófano y de la duración de la intervención quirúrgica y por eso estamos asumiendo que un máximo de 3 se pueden operar en una jornada laboral. Se asumen los siguientes recursos disponibles: tres médicos, un enfermero y un auxiliar para cada día de la semana.

El objetivo de este estudio es de identificar los días laborables con más carga de trabajo. Por eso, se consideran simulaciones de cada día de la semana por un periodo de 480 minutos de simulación (que corresponde a las 8 horas laborales) y un intervalo de confianza de 98%. Después de cada simulación se calculará la probabilidad que todos los pacientes acaben las actividades correspondientes de sus días clínicos y también la probabilidad de tener los recursos disponibles después de 480 minutos.

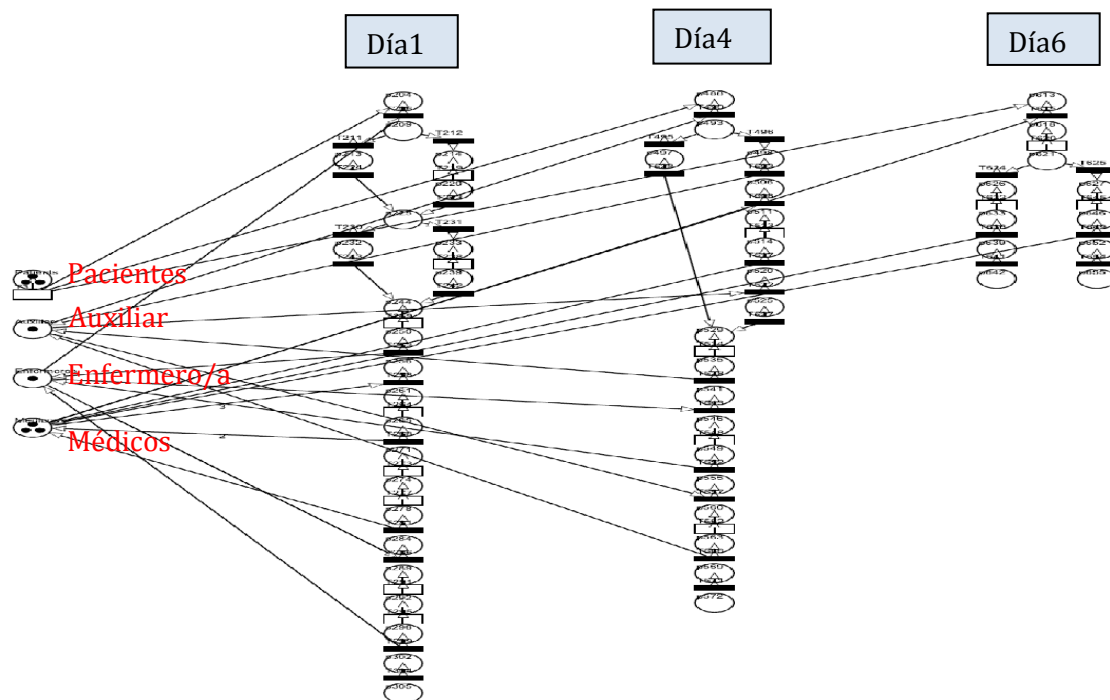


Figura 2.1: Día de lunes

El día de 'Lunes' tenemos los días 6, 1 y 4 de la vía clínica, que son el final de la vía clínica para los pacientes operados el miércoles de la semana pasada, el día de la operación para los pacientes ingresados el domingo y el tercer día postoperatorio de los pacientes operados el viernes de la semana pasada.

Lunes										
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica			Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad			E{Auxiliar}	1	1	480
			cadera	final día 1	Operación	E{Enfermeros}	0,986	0,986		
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{Medicos}	2,04931	0,683103333		
				final día 6	final día 6	E{#p326}	1,53667	0,51223333		
					E{#p582}	2,976436	0,992145333			
						E{#p662}+E{#p675}	2,99995	0,999983333		

Tabla 2.1: Resultados de la simulación para el día de 'Lunes'

En la tabla 2.1 se presentan los resultados de la simulación del día de lunes. Se observa que después de 480 minutos, los recursos enfermeros/as y auxiliares acaban su jornada de trabajo con una probabilidad alta pero en caso de los médicos la probabilidad es de 68%. Los pacientes acaban los días clínicos 4 y 6 satisfactoriamente con altas probabilidades, pero los pacientes del día1 acaban con una probabilidad de 51%.

Las bajas probabilidades de que los recursos médicos queden libres y que los pacientes del día1 finalicen dicho día clínico son tan bajas debido a que el día de la operación (día1) requiere de los 3 médico y las actividades de este día son de más duración que la del resto de días clínicos.

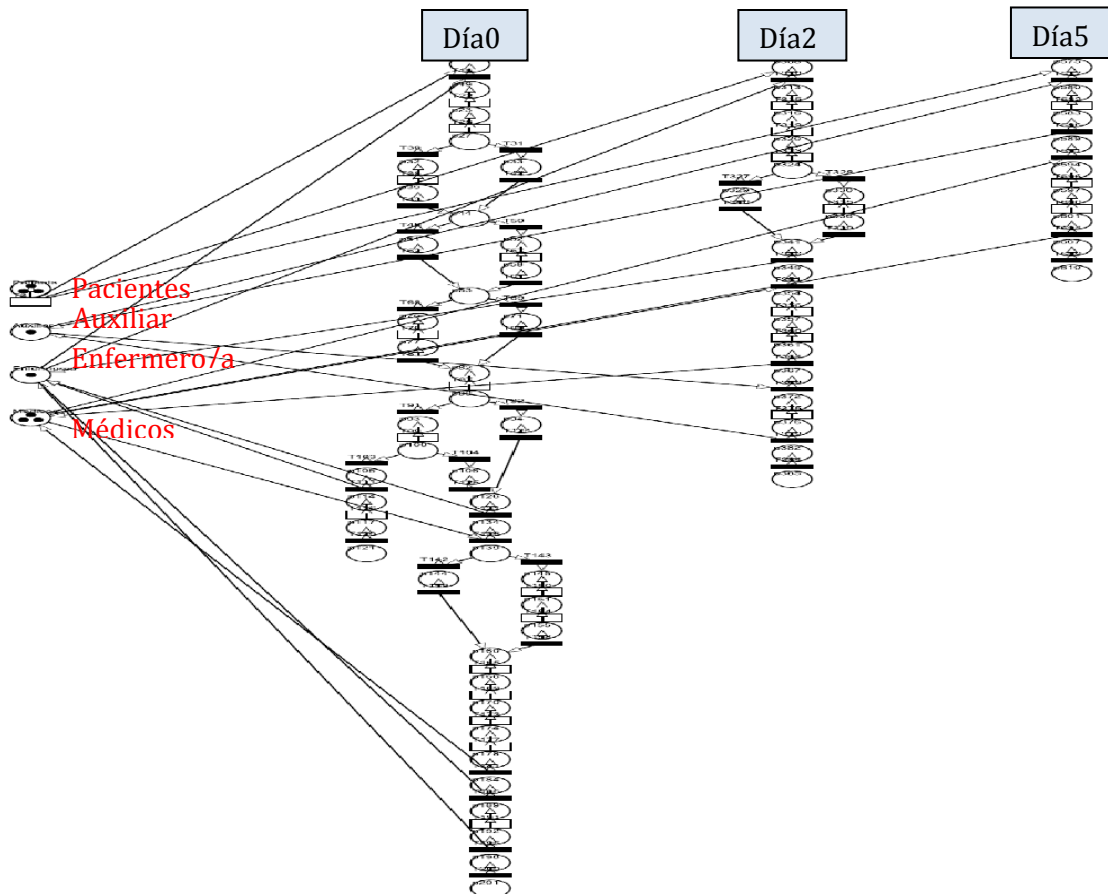


Figura 2.2: Día de martes

El 'Martes' tenemos los días 0, 2 y 5 de la vía clínica, que son: el día del ingreso, el primer día postoperatorio y el cuarto día postoperatorio respectivamente. Estos son los días clínicos son la continuación de los del 'Lunes' y se atienden a los pacientes que vienen del Lunes.

Martes									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	1	1	480
			cadera	final día 0	Final día0	E{Enfermeros}	1	1	
				final día 2	Primer día postoperatorio	E{Medicos}	3	1	
			final día 5	Cuarto día postoperatorio	E{#p121}+E{#p222}	3	1		
					E{#p405}	3	1		
					E{#p620}	3	1		

Tabla 2.2: Resultados de la simulación para el día de Martes

En la tabla 2.2 se presentan os resultados obtenidos de la simulación del día de 'Martes'. Se observa que después de 480 minutos, los pacientes finalizan su día clínico respectivo con una probabilidad de 100% y también los recursos auxiliares, enfermeros/as y médicos quedan disponibles con una probabilidad del 100%.

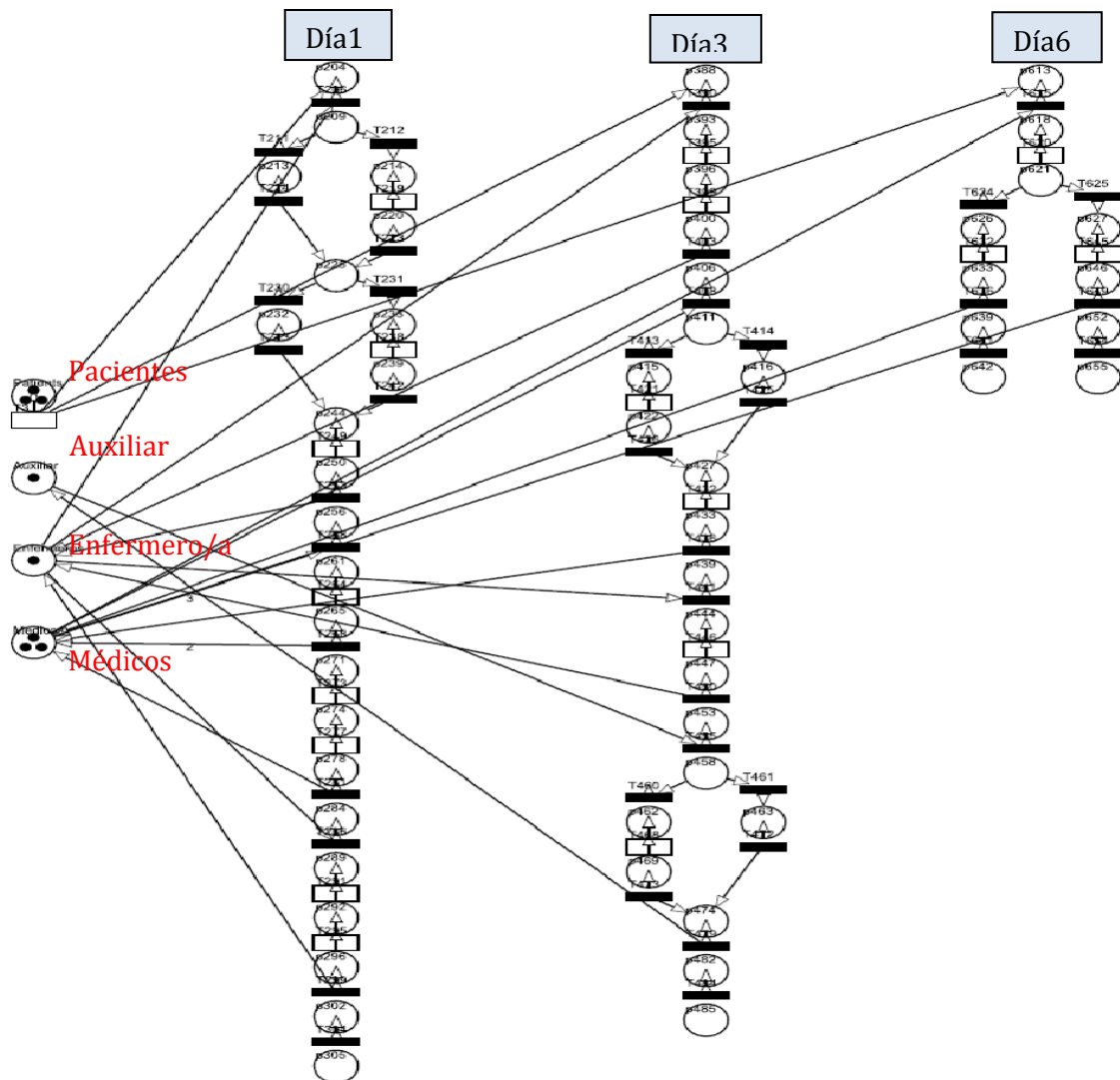


Figura 2.3: Día de Miércoles

El 'Miércoles' hay los días 1, 3 y 6 de la vía clínica, que son: el día de la operación, el segundo día postoperatorio y el final de la vía clínica respectivamente.

Miércoles										
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Vía Clínica			Formulas Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad			E{Auxiliar}	0,995	0,995	480
							E{Enfermeros}	0,98333	0,98333	
			cadera	final día 1	Operación	E{#p326}	2,3855	0,795166667		
				final día 3	Segundo día postoperatorio	E{#p505}	2,97222	0,99074		
		final día 6	final día6	E{#p662}+E{#p675}	2,99333	0,997776667				

Tabla 2.3: Resultados de la simulación para el día de miércoles

En la tabla 2.3 se presentan los resultados de la simulación del día de miércoles. Se observa que después de 480 minutos, los recursos enfermeros/as y auxiliares acaban su jornada de trabajo con una probabilidad alta pero en caso de los médicos la probabilidad es de 62%. Los pacientes que se encuentran día clínico 3 y 6 finalizan el día con probabilidad alta pero los que se encuentran en el día1 finalizan con probabilidad de 79%.

Las bajas probabilidades de que los recursos médicos queden libres y que los pacientes del día1 finalicen dicho día clínico son tan bajas debido a que el día de la operación (día1) se requiere del los 3 médico y las actividades de este día son de más duración que la del resto de días clínicos al igual que pasaba el Lunes.

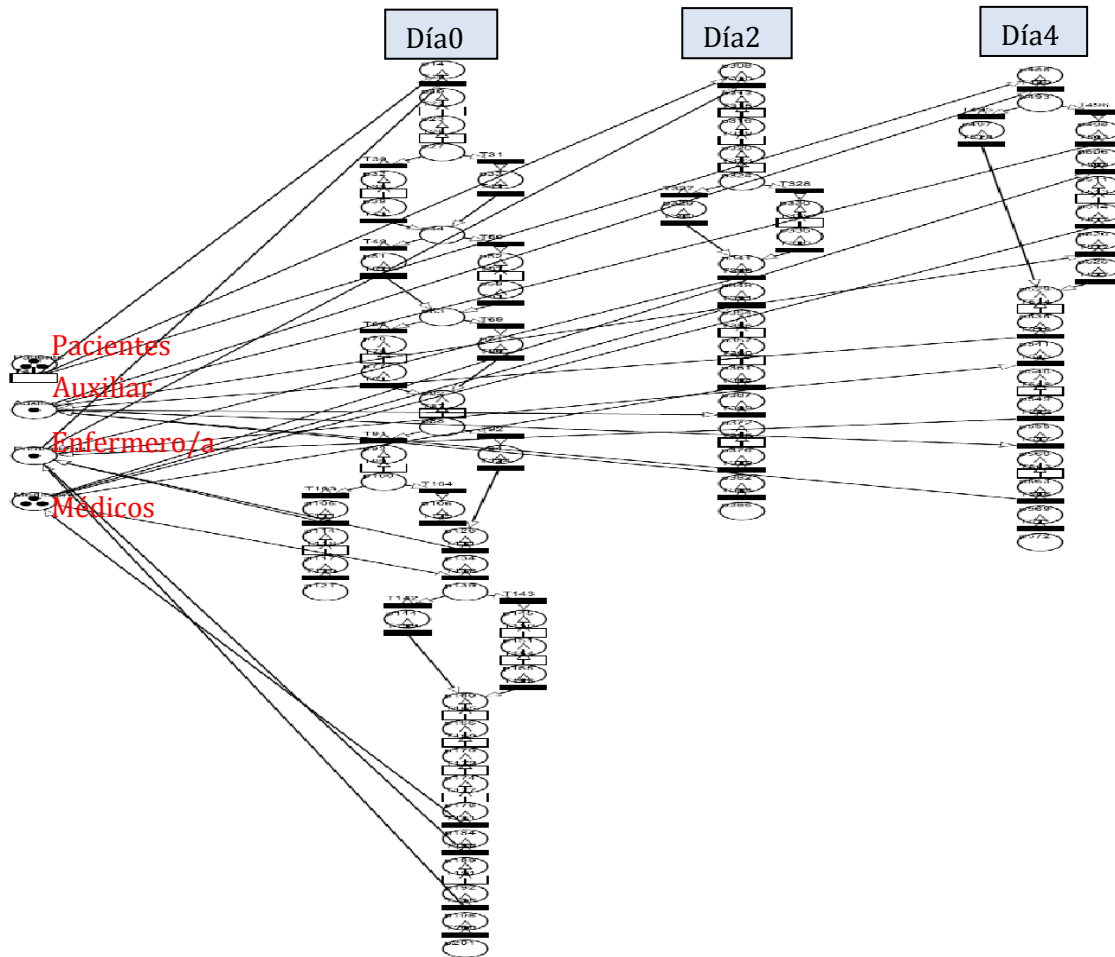


Figura 2.4: Día de jueves

El 'Jueves' hay que considerar los días 2, 4 y 0 de la vía clínica, que son: el primer día postoperatorio, el tercer día postoperatorio y el día del ingreso respectivamente.

Jueves									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica		Formulas Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	0,995	0,995	480
			cadera	final día 0	operación cancelada	E{#p121}+E{#p222}	2,99167	0,99723333	
				final día 2	Primer día postoperatorio	E{#p405}	2,9975	0,999166667	
final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p582}	2,998	0,999333333					

Tabla 2.4: Resultados de la simulación para el día jueves

En la tabla 2.4 que presentan los resultados por simulación del día de jueves se observa evoluciones parecidas al día de martes. En estos dos días no hay intervenciones quirúrgicas por lo cual las probabilidades de que se acaben todas las actividades y que los recursos humanos acaben la jornada laboral son muy altas.

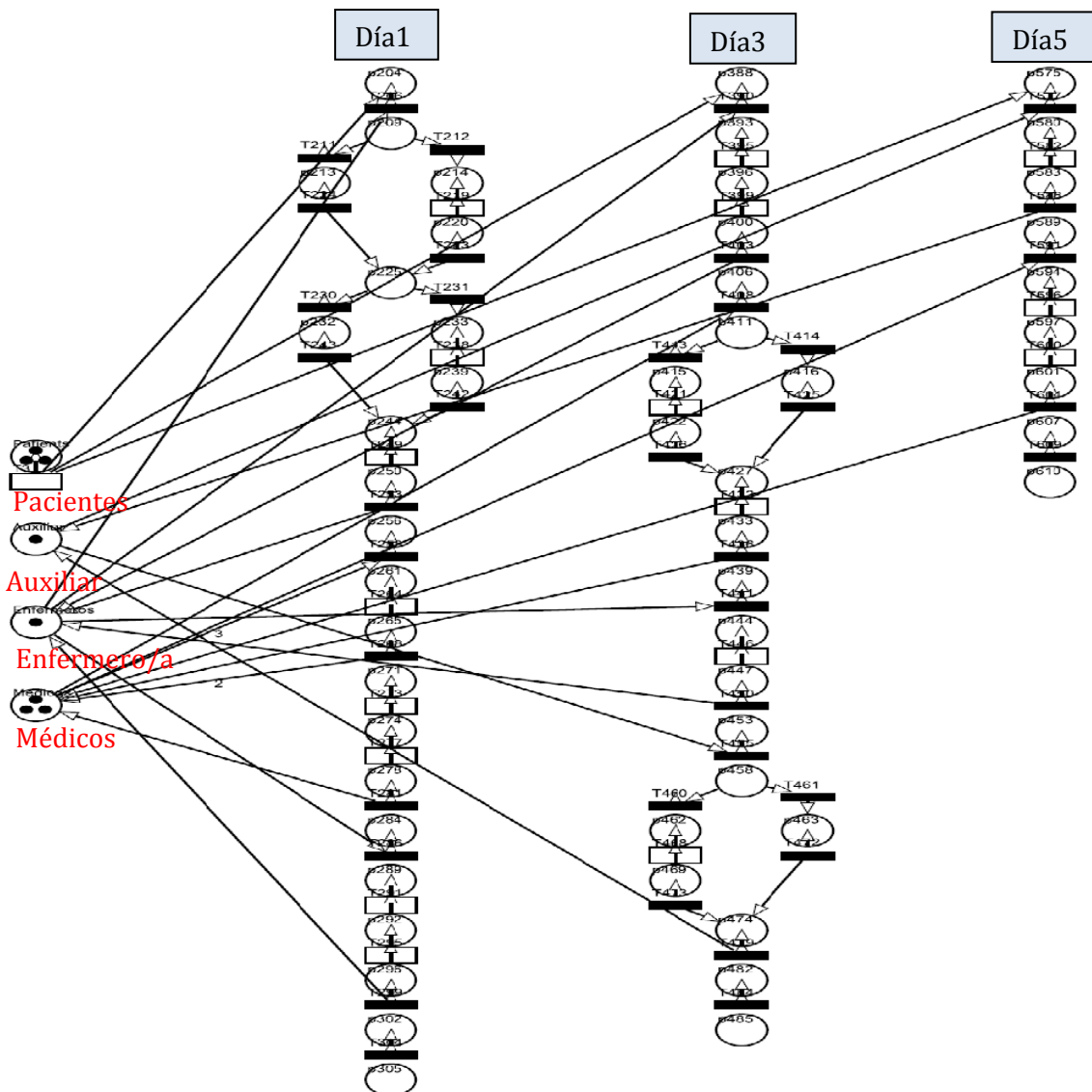


Figura 2.5: Día de viernes

Para el 'Viernes' tenemos los días 3, 5 y 1 de las vías clínicas, que son el segundo día postoperatorio, el cuarto día postoperatorio y el día de la operación respectivamente.

Viernes								
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Vía Clínica		Formulas Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos		E{Auxiliar}	0,99571	0,99571	480
					E{Enfermeros}	0,985	0,985	
					E{Medicos}	1,95909	0,65303	
			cadera	final día 1	Operación	E{#p326}	2,42	
			final día 3	Segundo día postoperatorio	E{#p505}	2,945	0,981666667	
			final día 5	Cuarto día postoperatorio	E{#p620}	2,93857	0,979523333	

Tabla 2.5: Resultados de la simulación para el día viernes

Con los resultados obtenidos presentados en la tabla 2.5, se observan probabilidades bastantes parecidas al día de miércoles además en ambas se opera.

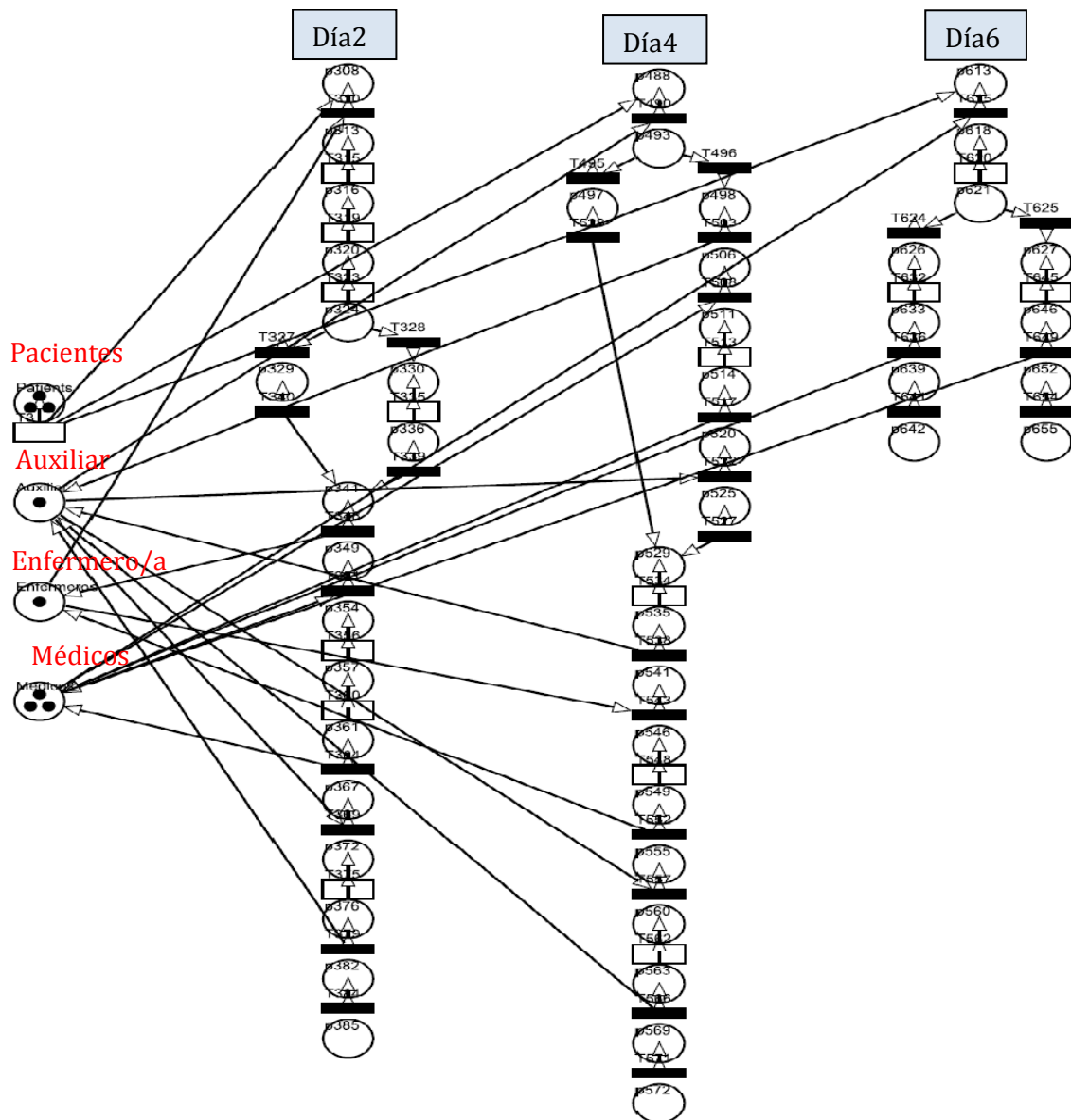


Figura 2.6: Día de sábado

Para el 'Sábado' tenemos los días 4, 6 y 2 de las vías clínicas, que son el tercer día postoperatorio, el final de la vía clínica y el primer día postoperatorio respectivamente.

Sábado									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Via Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	1	1	480
			cadera	final día 2	Primer día postoperatorio	E{Enfermeros}	1	1	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{Medicos}	3	1	
			final día 6	final día6	E{#p405}	3	1		
					E{#p582}	3	1		
					E{#p662}+E{#p675}	3	1		

Tabla 2.6: Resultados de la simulación para el día sábado

En la tabla 2.6 se presentan os resultados obtenidos de la simulación del día de 'Sábado'. Se observa que después de 480 minutos, los pacientes finalizan su día clínico respectivo con una probabilidad de 100% y también los recursos auxiliares, enfermeros/as y médicos quedan disponibles con una probabilidad del 100%, al igual que el Martes.

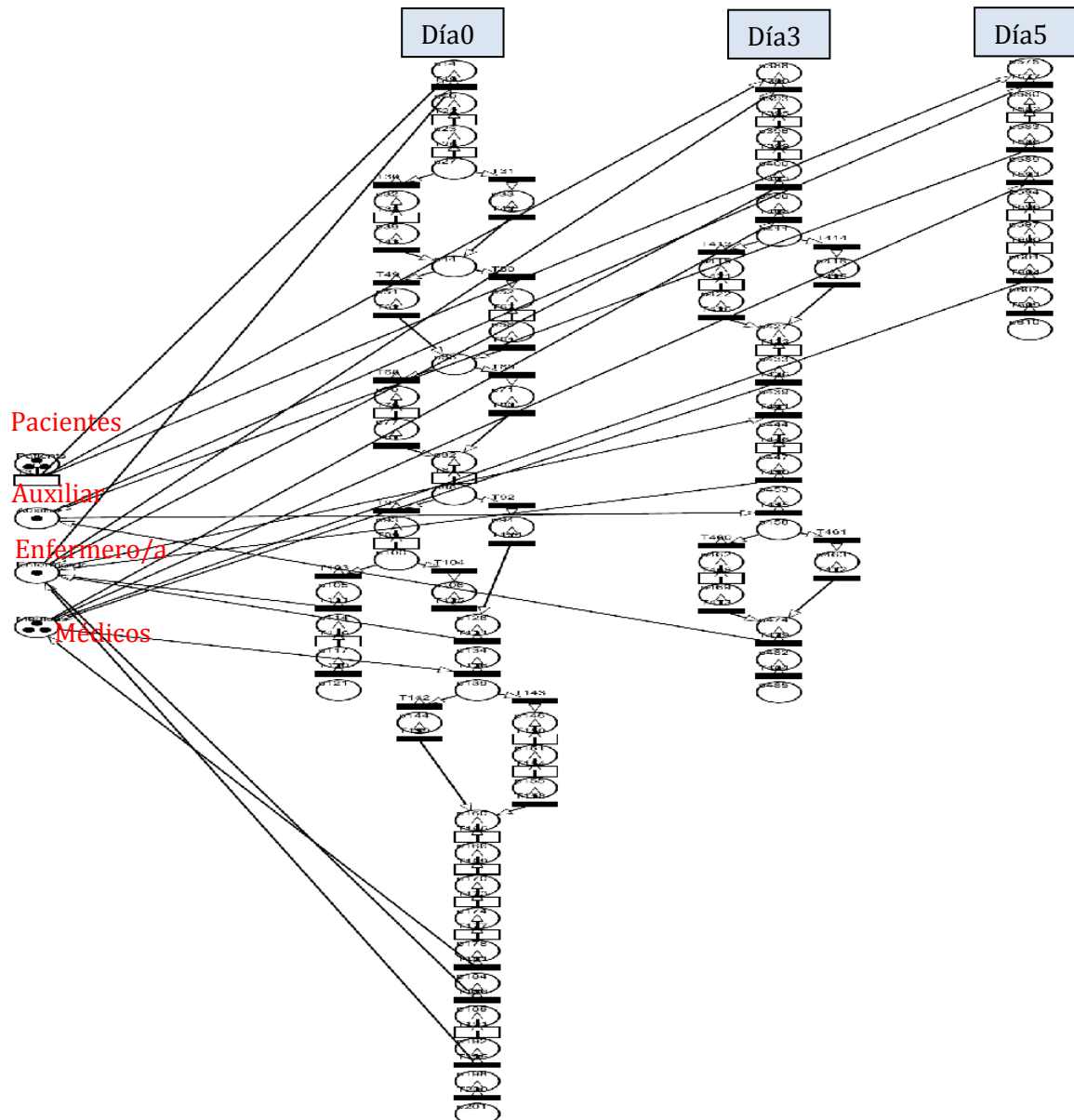


Figura 2.7: Día de domingo

Para el 'Domingo' tenemos los días 5, 0 y 3 de la vía clínica, que son: el cuarto día postoperatorio, el día del ingreso y el segundo día postoperatorio respectivamente.

Domingo									
Escenario	Evaluación	Tipo de Red	Recursos/Vía Clínica			Formulas Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	1	1	480
						E{Enfermeros}	1	1	
			cadera	final día 0	final día0	E{#p121}+E{#p222}	3	1	
				final día 3	Segundo día postoperatorio	E{#p505}	3	1	
			final día 5	Cuarto día postoperatorio	E{#p620}	3	1		

Tabla 2.7: Resultados de la simulación para el día domingo

En la tabla 2.7 se presentan los resultados obtenidos de la simulación del día de 'Domingo'. Se observa que después de 480 minutos, los pacientes finalizan su día clínico respectivo con una probabilidad de 100% y también los recursos auxiliares, enfermeros/as y médicos quedan disponibles con una probabilidad del 100%, al igual que el Martes y el Sábado.

Conclusión de este estudio. Se observa que los días de las intervenciones quirúrgicas (lunes, miércoles y viernes) la probabilidad que se acaben todas las actividades de todos los pacientes es alrededor de 70% y que los médicos no acaban su jornada laboral con una probabilidad alta. La solución es de utilizar más médicos, siendo el recurso que limita las prestaciones. En la sección 5.1, se ha propuesto un estudio para obtener un número óptimo de médicos para distintos números de pacientes. Además en el anexo 3 se encuentran las simulaciones adicionales para el estudio de número óptimo de médicos.

Anexo 3. Simulaciones adicionales para el estudio de número óptimo de médicos

En este anexo se muestran todas las simulaciones obtenidas para el estudio considerado en el apartado “5.1 –Número óptimo de médicos”. Las simulaciones se realizan en las mismas condiciones que en 5.1. Consiste en considerar las dos vías clínicas que se ejecutan en paralelo compartiendo los mismos recursos pero asumiendo que los días de las intervenciones quirúrgicas son lunes, miércoles y viernes. En el anexo 2 se ha visto que el cuello de botella es el día de lunes (que aunque se operen los días miércoles y viernes también, el lunes es el que menos recursos médicos libres tiene y por tanto el día mas perjudicado por falta de médicos) por lo cual se considera este día para estudiar el número óptimo de médicos.

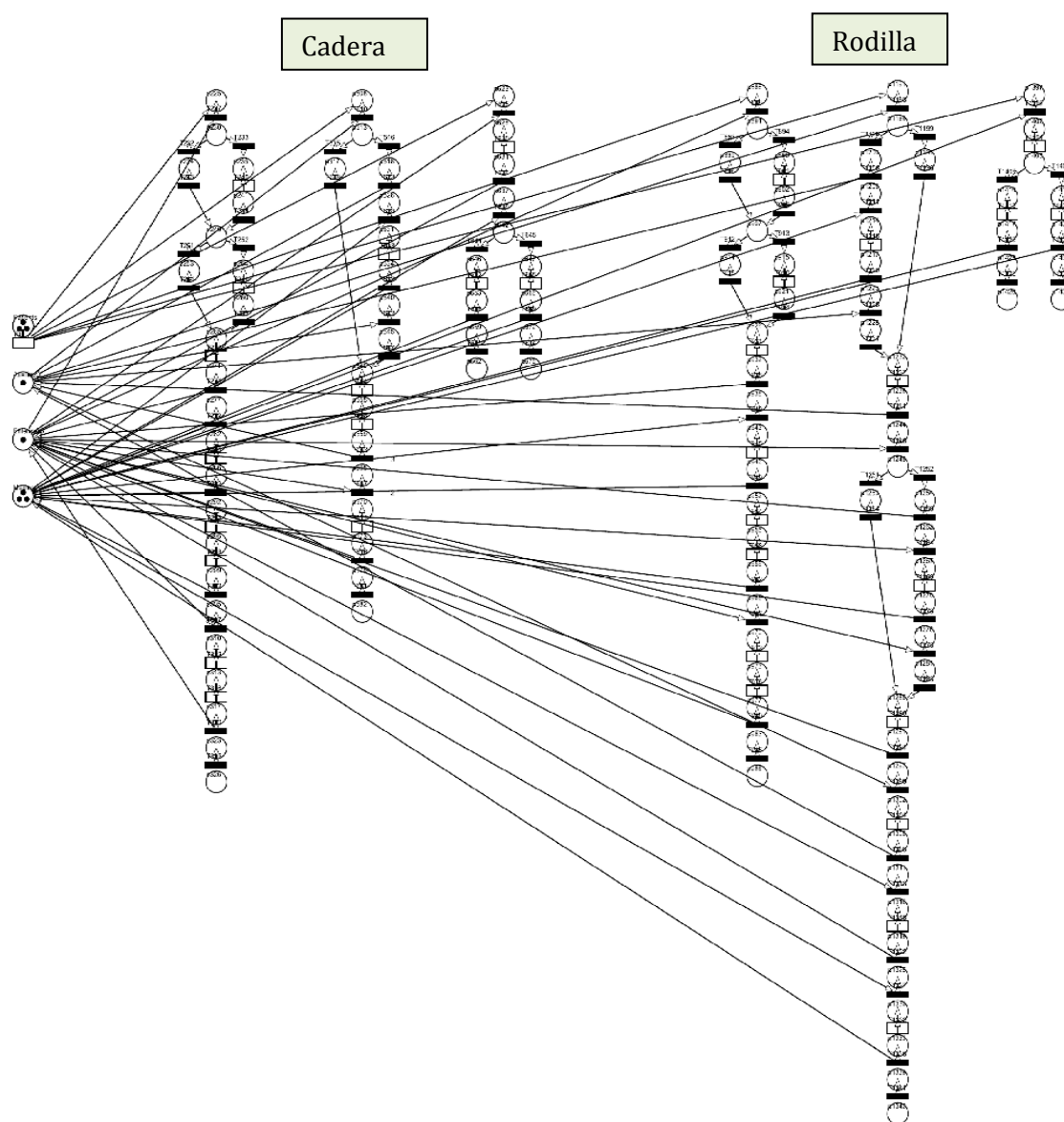


Figura 3.1: El día de lunes con las dos vías clínicas

Para el lunes nos encontramos con 6 días, 3 de cada vía clínica, como se ve en la figura 3.1. Para ambas tenemos los días 6, 1 y 4, que son el final de la vía clínica, el día de la operación y el tercer día postoperatorio respectivamente. Ambas vías clínicas comparten los mismos recursos.

Las siguientes simulaciones se hacen para 480 minutos e intervalo de confianza del 98%.

Lunes									
Escenario	Evaluación	Tipo de Re	Recursos/Vía Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	0,992	0,992	480
						E{Enfermeros}	0,9065	0,9065	
						E{Medicos}	0,35417	0,11805667	
			cadera	final día 1	Operación	E{#p326}	1,47	0,49	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p582}	2,97	0,99	
				final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,926	0,97533333	
			rodilla	final día 1	Operación	E{#p986}	1,479	0,493	
final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p1342}		2,37433	0,79144333				
final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}		2,995	0,9983				

Tabla 3.1: 3 Médicos

Para 3 médicos se obtienen malos resultados. Las probabilidades de que un paciente llegue al final de un día son bajas en el día 1 con un 49% y en el día 4 con un 79% de probabilidad de la vía clínica rodilla y el día 1 con un 49% de probabilidad de la vía clínica cadera. La probabilidad de que los recursos de enfermeros/as y auxiliares se liberen son altas y las de los médicos malas siendo de 11%.

Lunes									
Escenario	Evaluación	Tipo de Re	Recursos/Vía Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	1	1	480
						E{Enfermeros}	0,94767	0,94767	
						E{Medicos}	1,455	0,36375	
			cadera	final día 1	Operación	E{#p326}	1,76048	0,58682667	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p582}	3	1	
				final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}	3	1	
			rodilla	final día 1	Operación	E{#p986}	1,71792	0,57264	
final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p1342}		2,991	0,997				
final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}		3	1				

Tabla 3.2: 4 Médicos

Para 4 médicos se obtienen malos resultados también pero a diferencia para el día 4 de rodilla ahora se obtienen altos valores de probabilidad. El día 1 que es el día de la operación es el único día de ambas vías que se obtiene bajas probabilidades con un 58%, y el recurso médico ha aumentado bastante pero sigue siendo muy bajas con un 36%.

Lunes									
Escenario	Evaluación	Tipo de Re	Recursos/Vía Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	1	1	480
						E{Enfermeros}	0,95533	0,95533	
						E{Medicos}	2,48125	0,49625	
			cadera	final día 1	Operación	E{#p326}	1,7505	0,5835	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p582}	2,999	0,99966667	
				final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}	3,00489	1,00163	
			rodilla	final día 1	Operación	E{#p986}	1,794	0,598	
final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p1342}		2,99214	0,99738				
final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}		3	1				

Tabla 3.3: 5 Médicos

Para 5 médicos las probabilidades de que un paciente llegue al final de un día son muy similares a la anterior de 4 médicos. Pero la probabilidad de los recursos médicos sigue aumentando siendo de 49%, aun así el resultado es bajo y hay que seguir aumentando el número de recursos hasta llegar al valor óptimo.

Lunes								
Escenario	Evaluación	tipo de Re	Recursos/Via Clínica	Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad	E{Auxiliar}	0,999	0,999	480
					E{Enfermeros}	0,943446	0,943446	
					E{Medicos}	4,042	0,67366667	
			cadera	final día 1 Operación	E{#p326}	2,593	0,86433333	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p582}	2,998	0,99933333	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,997	0,999	
			rodilla	final día 1 Operación	E{#p986}	2,59	0,86333333	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p1342}	2,88138	0,96046	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,92667	0,9756	

Tabla 3.4: 6 Médicos

Para 6 médicos el día 1 de ambas vías ha mejorado mucho con un 86% de probabilidad de finalizar el día clínico, pero aún se puede mejorar más. La probabilidad de que se liberen los recursos médicos son malos, siendo de 67%, pero ya nos estamos acercando al valor óptimo poco a poco.

Lunes								
Escenario	Evaluación	tipo de Re	Recursos/Via Clínica	Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad	E{Auxiliar}	1	1	480
					E{Enfermeros}	0,963	0,963	
					E{Medicos}	5,285	0,755	
			cadera	final día 1 Operación	E{#p326}	2,663	0,88766667	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p582}	3	1	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	3	1	
			rodilla	final día 1 Operación	E{#p986}	2,635	0,87833333	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p1342}	2,988	0,996	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	3	1	

Tabla 3.5: 7 Médicos

Para 7 médicos, se obtienen probabilidades más aceptables. Las probabilidades de que un paciente llegue al final de un día son buenas, pero se puede mejorar aún un poco más el día 1 de ambas vías que están en un 88%. Y las probabilidades de los recursos médicos han mejorado bastante, 75%, pero es necesario aumentar un poco más el número de recursos médicos.

Lunes								
Escenario	Evaluación	tipo de Re	Recursos/Via Clínica	Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad	E{Auxiliar}	1	1	480
					E{Enfermeros}	0,96533	0,96533	
					E{Medicos}	6,37375	0,79671875	
			cadera	final día 1 Operación	E{#p326}	2,675	0,89166667	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p582}	2,997	0,999	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,99867	0,99956667	
			rodilla	final día 1 Operación	E{#p986}	2,675	0,89166667	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p1342}	2,992	0,99733333	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	3	1	

Tabla 3.6: 8 Médicos

Para 8 médicos, los resultados son muy parejos al anterior para 7 médicos. Es necesario aumentar más los recursos.

Lunes								
Escenario	Evaluación	tipo de Re	Recursos/Via Clínica	Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad	E{Auxiliar}	0,999	0,999	480
					E{Enfermeros}	0,974	0,974	
					E{Medicos}	8,0825	0,89805556	
			cadera	final día 1 Operación	E{#p326}	2,82867	0,94289	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p582}	2,999	0,99966667	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,99111	0,99703667	
			rodilla	final día 1 Operación	E{#p986}	2,81706	0,93902	
				final día 4 Tercer día postoperatorio	E{#p1342}	2,97381	0,99127	
				final día 6 final día 6	E{#p662}+E{#p675}	2,945	0,9817	

Tabla 3.7: 9 Médicos

Para 9 médicos, se obtienen buenos resultados para que un paciente finalice cualquier día, así como para los recursos humanos. Aun así se hace una última simulación para 10 médicos para ver si merece la pena o no quedarnos con este último valor.

Lunes									
Escenario	Evaluación	tipo de Re	Recursos/Vía Clínica		Formula Medias	Medias	Probabilidad	Tiempo	
Prueba	Simulación transitoria	recursos (editado)	recursos humanos	Disponibilidad		E{Auxiliar}	1	1	480
						E{Enfermeros}	0,98167	0,98167	
						E{Medicos}	9,075	0,9075	
			cadera	final día 1	Operación	E{#p326}	2,84071	0,94690333	
				final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p582}	3	1	
				final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}	3	1	
				final día 1	Operación	E{#p986}	2,8275	0,9425	
rodilla	final día 4	Tercer día postoperatorio	E{#p1342}	2,9835	0,9945				
	final día 6	final día 6	E{#p662}+E{#p675}	3	1,0000				

Tabla 3.8: 10 Médicos

Por último para 10 médicos, la mejora de resultados no es muy notoria. En este caso no merecería la pena invertir tanto por aumentar un recurso medico más si la mejoría es tan baja, de modo que lo más rentable es usar 9 médicos, 1 enfermero/a y 1 auxiliar para llevar las dos vías clínicas.

Una observación que se hace es que, antes con menos médicos se obtenían mejores resultados, y se ha visto la influencia de añadirle otra vía clínica.

Finalmente se a conseguido el objetivo que era mejorar la atención clínica encontrando el número optimo de médicos. Se disminuye el tiempo de atención al paciente ya que los médicos se encuentran disponibles. De este modo los pacientes no tienen que esperar como ocurría en el estudio anterior para 3 médicos. También los médicos no se encuentran tan saturados y esto implica que dará un servicio con más calidad.

Anexo 4. HEAT-Monitor, simulaciones

Para generar las redes de recursos utilizadas en el apartado 6, se ha utilizado HEAT-Monitor desde el cual se han ingresado en el historial de pacientes. En la tabla 4.1 hay 2 pacientes para operar en cada uno de los 4 días indicados, con el tipo de operación que requiere (especificada en la columna operación).

Día de operación	Operación	
7	Cadera	Rodilla
9	Cadera	Cadera
11	Cadera Autotransfusión	Rodilla
14	Rodilla Autotransfusión	Rodilla Autotransfusión

Tabla 4.1: Historial de operaciones

En la tabla 4.2 se ve como han quedado los días clínicos organizados para atender a los 8 pacientes del historial de pacientes al transformar la red por fechas en HEAT-Designer.

	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
C/R	0	1	2	3	4	5	6							
C/C			0	1	2	3	4	5	6					
CAutoT/R					0	1	2	3	4	5	6			
RAutoT/RAutoT								0	1	2	3	4	5	6

Tabla 4.2: Organización de los días clínicos

Los pacientes de cada día de la semana son atendidos por: 1 auxiliar, 1 enfermero/a y 3 médicos. Los días clínicos de cada día se ejecutan en paralelo y comparten recursos.

En un principio se iba a realizar un estudio como el del anexo 2 con esta información. Para no repetir los mismos estudios, solo nos quedamos con los días 6 y 8 para poder ver como son las redes y de donde salen (HEAT-Monitor) utilizadas en el apartado 6. Donde se ha preparado eso dos días con redes coloreadas para ver las diferencias de la RdP con las RdP de colores.

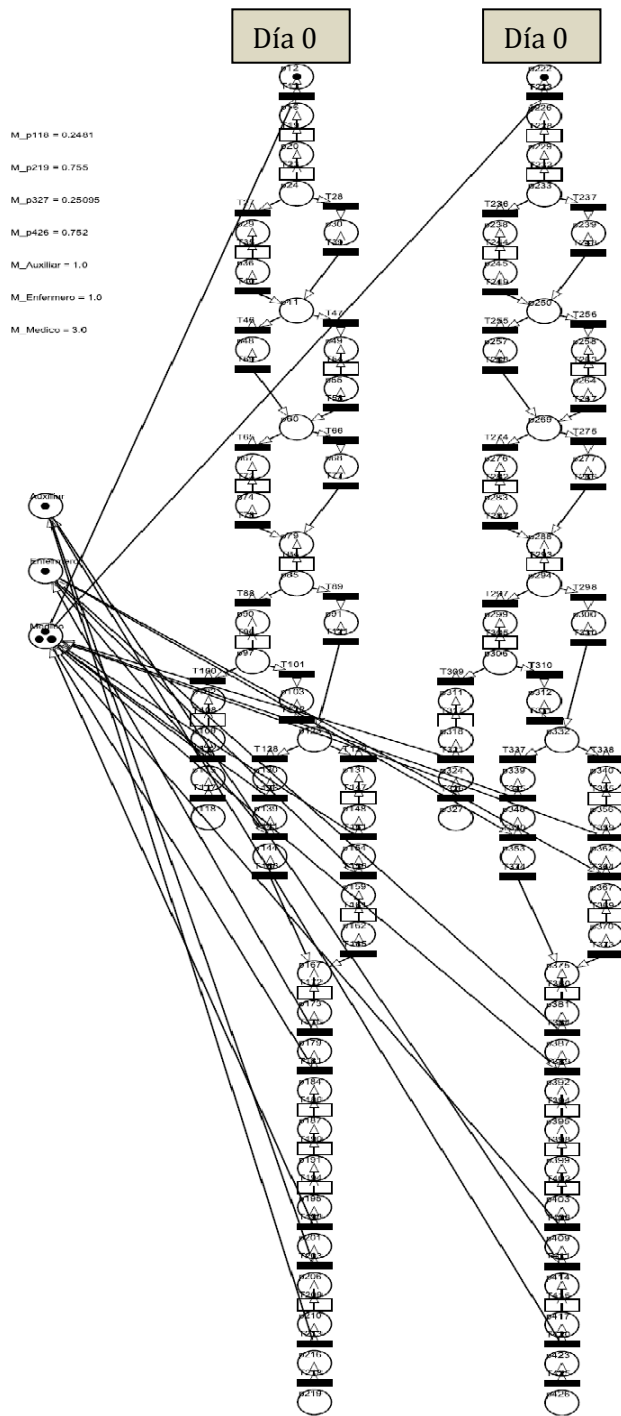


Figura 4.1: RdP, Domingo 6

El Domingo 6, se realizan las operaciones del día 0 de ambas vías clínicas correspondientes al día de ingreso del paciente.

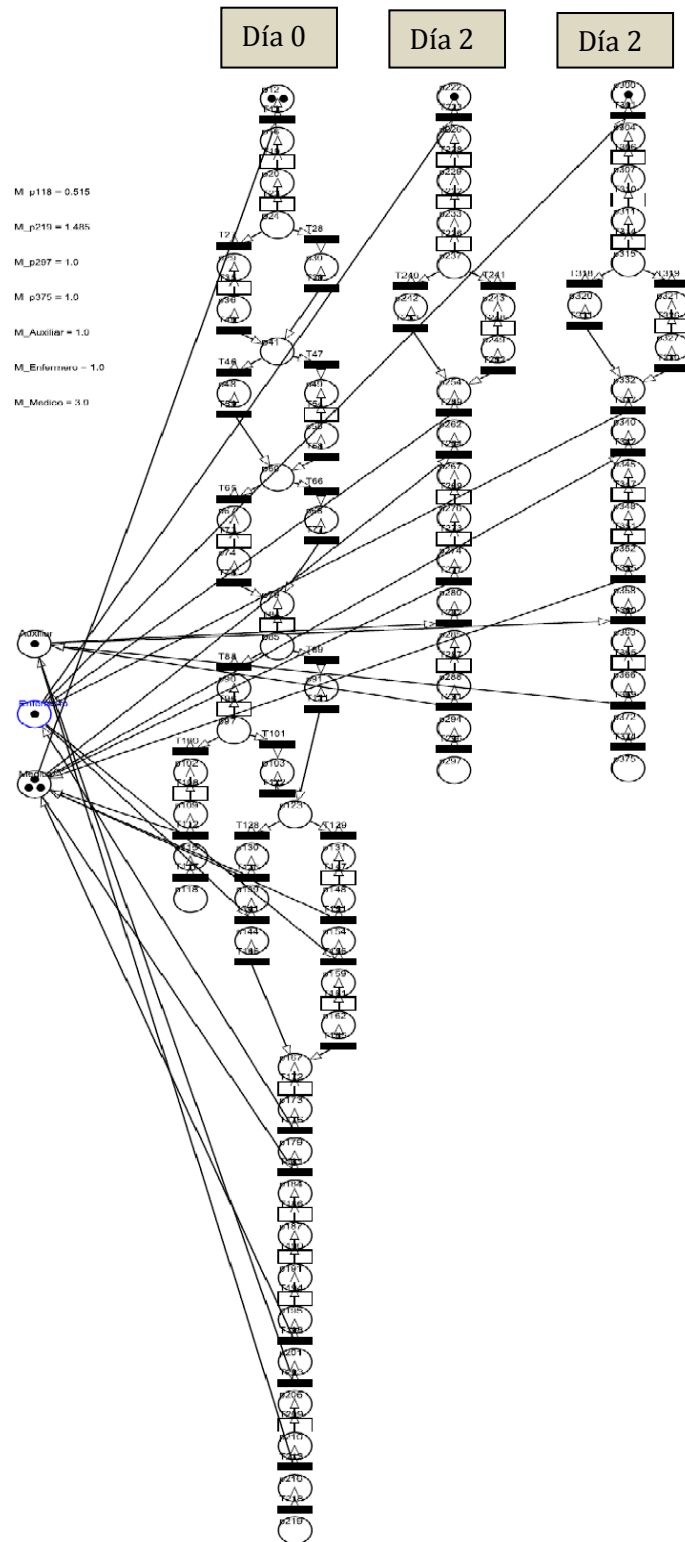


Figura 4.2: Red de recursos Martes 8

El Martes 8, para la vía clínica de cadera, se realizan las operaciones del día 0 y 2 que corresponden al día de ingreso y el primer día postoperatorio respectivamente y de la rodilla el día 2 que corresponden al primer día postoperatorio.

Anexo 5. Camas libres

En esta sección se considera la organización real del Departamento de Traumatología y Cirugía Ortopédica del Hospital Clínico “Lozano Blesa”. Utilizando los modelos de redes de Petri, se presenta una metodología para poder estimar el número necesario de camas en función del número de pacientes que se operan.

Los médicos del Departamento mencionado están divididos en 5 equipos, cada equipo siendo compuesto por 5 Médicos. Además, todos los días hay dos médicos de guardia por si surgen imprevistos en algún equipo (como vacaciones, no asiste por fuerza mayor, permisos, etc.). Cada día de la semana, hay un equipo que está responsable de las operaciones urgentes (UR), un equipo que opera pacientes de la lista de espera (LE) (las dos artroplastias consideradas corresponden a estos tipos de pacientes), otro equipo encargado de cirugías a pacientes que no necesitan ingreso (CMA), otro equipo en las consultas externas del hospital (C) y por fin otro equipo que tiene que desplazarse al ambulatorio para pasar las consultas (Amb). El reparto diario de los equipos a las cinco tareas mencionadas se hace por el jefe del servicio y una posible asignación semanal se presenta en la siguiente tabla.

	L	M	X	J	V
5_Equipos 2_guardia/día	UR	Amb	C	CMA	LE
	LE	UR	Amb	C	CMA
	CMA	LE	UR	Amb	C
	C	CMA	LE	UR	Amb
	Amb	C	CMA	LE	UR

Tabla 5.1: Equipos médicos

Se puede observar que todos los días entre semana hay tres equipos que operan (UR, LE, CMA) de lunes a viernes. Siendo las artroplastias de cadera y rodilla correspondientes a la lista de espera (LE), las simulaciones que se han realizado en este estudio están enfocadas a LE asumiendo que todos los días de la semana hay un equipo médico (compuesto por 5 médicos) que opera.

El objetivo del estudio es estimar el número de camas necesarias para los pacientes de artroplastia asumiendo distintos número de pacientes ingresados. En particular, se considera que se opera de Lunes a Viernes un número total de 6, 7 o 8 pacientes, que permanecerán en el hospital 7 días (si la recuperación es correcta). Para los hospitales es necesario conocer el número de camas necesario porque comparten en las diferentes plantas las camas, y por eso hace tan interesante este estudio. Para ello es necesario saber cuantos pacientes siguen ingresados para el final de la semana (marcado en amarillo en la tabla 5.2).

Médicos	Días clínicos							
Equipo 1	D día0	L día1	M día2	X día3	J día4	V día5	S día6	D día0
Equipo 2		L día0	M día1	X día2	J día3	V día4	S día5	D día6
Equipo 3			M día0	X día1	J día2	V día3	S día4	D día5
Equipo 4				X día0	J día1	V día2	S día3	D día4
Equipo 5					J día0	V día1	S día2	D día3

Tabla 5.2: Organización de los grupos médicos

De modo que esta organización se queda plasmada como se indica en la tabla 5.2. Los pacientes ingresarán el domingo, lunes, martes, miércoles y jueves marcados en azul en la tabla y se operan al día siguiente al ingreso marcado en rojo en la tabla. Cada equipo médico se encarga de los días clínicos de su fila que se indica en la tabla.

Se simula la red de petri de recursos que se asemeja al esquema de la fig. 5.1 para saber cuantos pacientes ingresan y a la fig. 5.2 para saber cuantos pacientes se dan de alta.

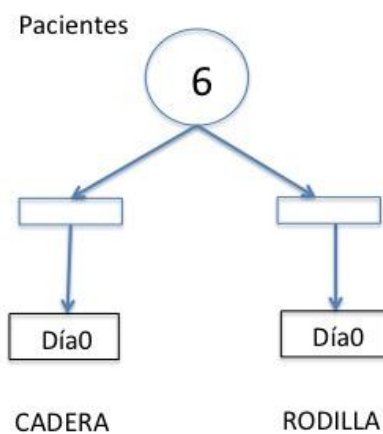


Figura 5.1: Pacientes ingresados

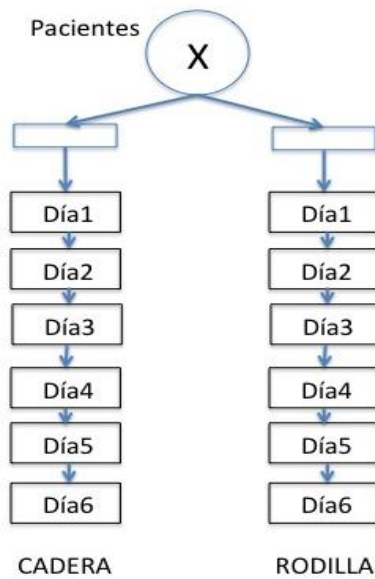


Figura 5.2: Alta de los pacientes

Las simulaciones se realizan a través de TimeNET para 480 minutos para el caso de la fig. 5.1 y 10080 minutos (24hx60x7días=10080 min) para el de la fig. 5.2 con un intervalo de confianza del 98% (para el caso de la fig. 5.2 se toman los valores obtenidos en el de la fig. 5.1 de pacientes ingresados, ya que esta es la continuación al ingreso). También se toman los casos de que lleguen el 50% de pacientes para operar de cadera, otro para el 70% y otro para el 30% y el resto de pacientes serían para operar de rodilla.

En la elección del día clínico 0 se toma un 5% de probabilidad de que los pacientes no sean ingresados y la elección del día clínico 6 un 10% de probabilidad de que los pacientes no sean dados de alta.

Como los 5 grupos médicos pasan por las mismas actividades aunque ingresen sus pacientes en distintos días, se usaran los mismos resultados obtenidos para los 5 grupos. Y con la siguiente formula se calculan las camas ocupadas tomando los datos de las simulaciones (es la suma de los pacientes que se encuentran ingresados en los días marcados en amarillo de la tabla 5.2).

$$D(\text{día7}) + D(\text{día6}) + D(\text{día5}) + D(\text{día4}) + D(\text{día3}) = \text{camas}$$

5 Médicos	Pacientes			<- pacientes que ingresan
	6x5	7x5	8x5	
50-50	24,43255	28,53496	32,46296	
70-30	24,44169	28,55838	32,63915	
30-70	24,44867	28,54549	32,50549	

Tabla 5.3: Camas ocupadas

Estas son las camas ocupadas (en la tabla 5.3). Si entran 6 pacientes por grupo, cada semana tenemos una media de 25 camas ocupadas, para 7 pacientes de 29 camas y para 8 pacientes 33 camas (como se ve en cada columna de pacientes).

%	Probabilidad camas ocupadas					
	Ingresados		Ingresados		Ingresados	
50-50	29,91	0,81686894	34,94	0,8166846	39,85	0,81462886
70-30	29,935	0,81649207	34,93	0,81758889	39,92	0,81761398
30-70	29,925	0,81699816	34,915	0,81757096	39,865	0,81538919

Tabla 5.4: Probabilidad de camas ocupadas

Para calcular la probabilidad de que una cama esté ocupada se realiza dividiendo los pacientes que no se han dado de alta con los que siguen ingresados entre el total de paciente que ingresaron y han ingresado, en la tabla 5.4 vemos los resultados (la columna ingresados, indica el número de pacientes ingresados y en la columna de su derecha su probabilidad).

%	camas			Probabilidad camas libres
	30	35	40	
50-50	0,18313106	0,1833154	0,18537114	
70-30	0,18350793	0,18241111	0,18238602	
30-70	0,18300184	0,18242904	0,18461081	

Tabla 5.5: Probabilidad de camas libres

Para calcular la probabilidad de que una cama quede libre, se usa la siguiente fórmula (probabilidades por columnas de 30/35/40 pacientes que ingresan, expresados en números enteros para ver las camas necesarias en cada caso):

$$(100 - \%CamasOcupadas = \%CamasLibres)$$

En el Clínico tiene 48 camas para la planta de traumatología, que se encarga de estas dos vías clínicas, y si operan a 8 pacientes diarios, necesitan disponer de 40 camas, según este estudio quedando 8 libres. Así que este estudio es razonable.

La conclusión que se tiene respecto al problema de no obtener ningún resultado variando el número de recursos médicos es que el día de operación es el cuello de botella pero el resto de días no requieren apenas tiempo ni recursos y de este modo compensa el tiempo que requieren de este recurso.

Anexo 6. Modelado de las redes coloreadas en CPNTools

Se han modelado las redes coloreadas en CPNTools siguiendo la tabla 4.2 del anexo 4, desde el domingo 6 hasta el viernes 11. También se han modelado las dos vías clínicas (de artroplastia de cadera y rodilla). Todas las redes comparten los recursos entre sus días clínicos.

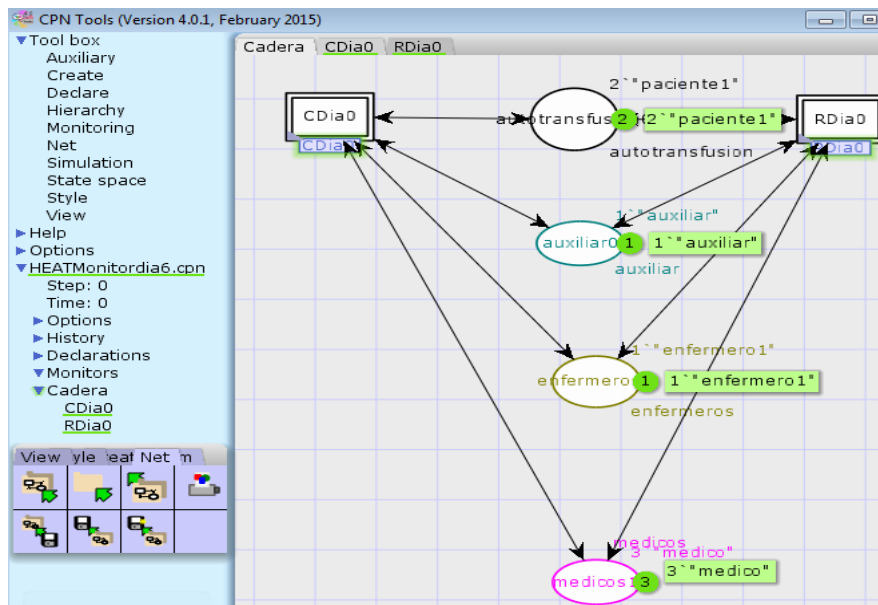


Figura 6.1: Día 6 modelado en CPNTools

La red de la fig. 6.1 contiene un paciente que ha ingresado en el día0 de Cadera y otro paciente que ha ingresado en el día0 de Rodilla.

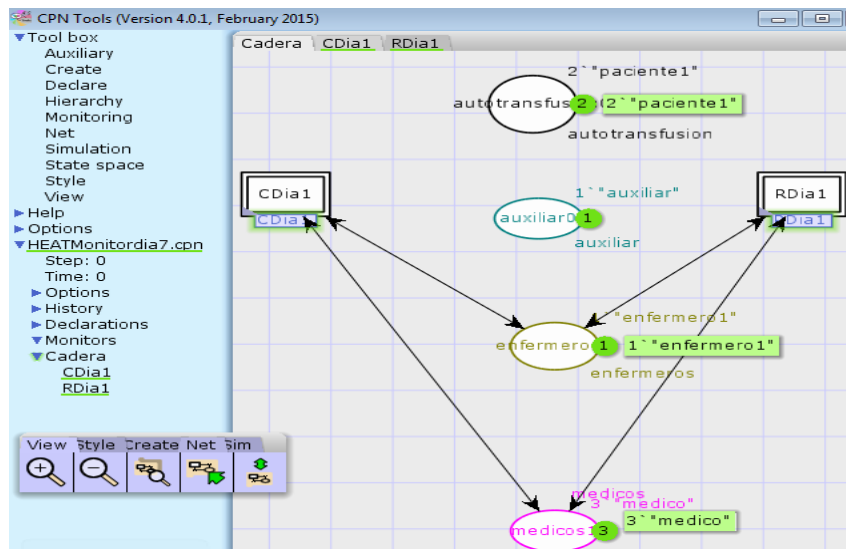


Figura 6.2: Día 7 modelado en CPNTools

La red de la fig. 6.2 contiene un paciente que se encuentra ingresado en el día1 de Cadera y un paciente que se encuentra ingresado en el día1 de Rodilla.

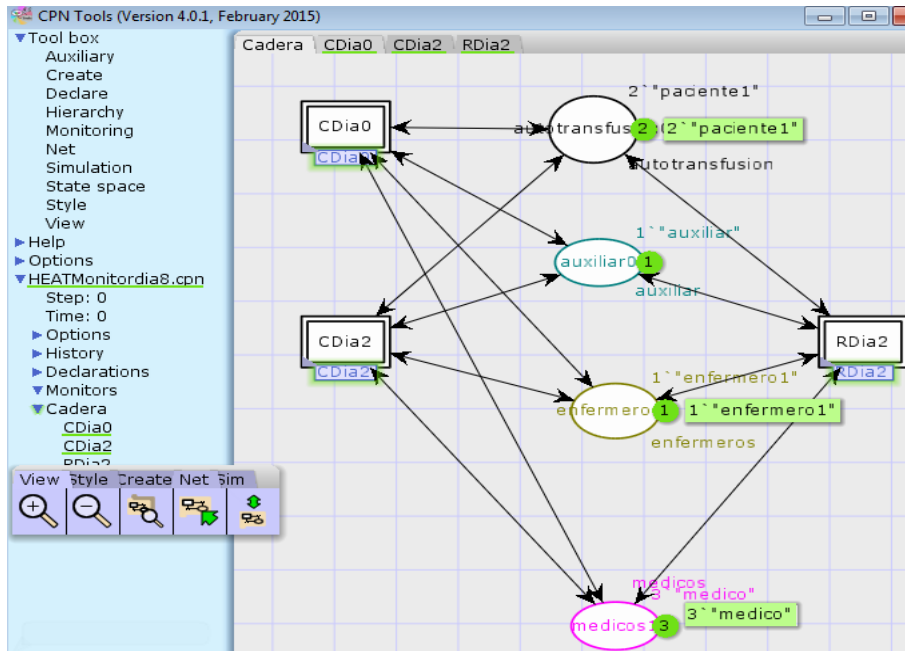


Figura 6.3: Día 8 modelado en CPN Tools

La red de la fig. 6.3 contiene un paciente que se encuentra ingresado en el día2 de Cadera, otro paciente que se encuentra ingresado en el día2 de Rodilla y además dos pacientes que acaban de ingresar en el día0 de Cadera.

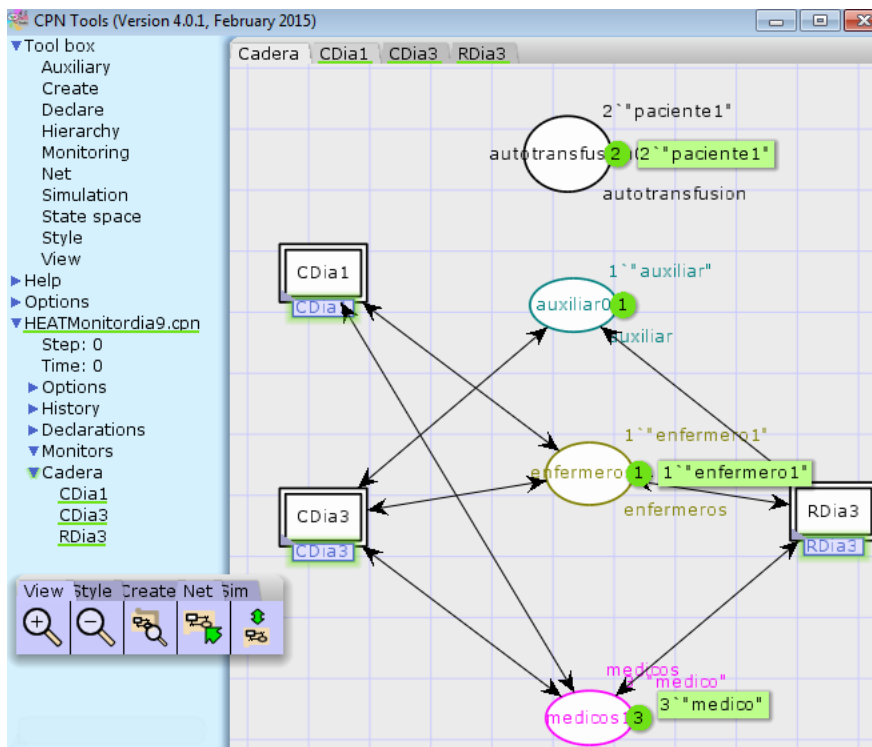


Figura 6.4: Día 9 modelado en CPNTools

La red de la fig. 6.4 contiene un paciente que se encuentra ingresado en el día3 de Cadera, otro paciente que se encuentra ingresado en el día3 de Rodilla y dos que se encuentran ingresados en el día1 de Cadera.

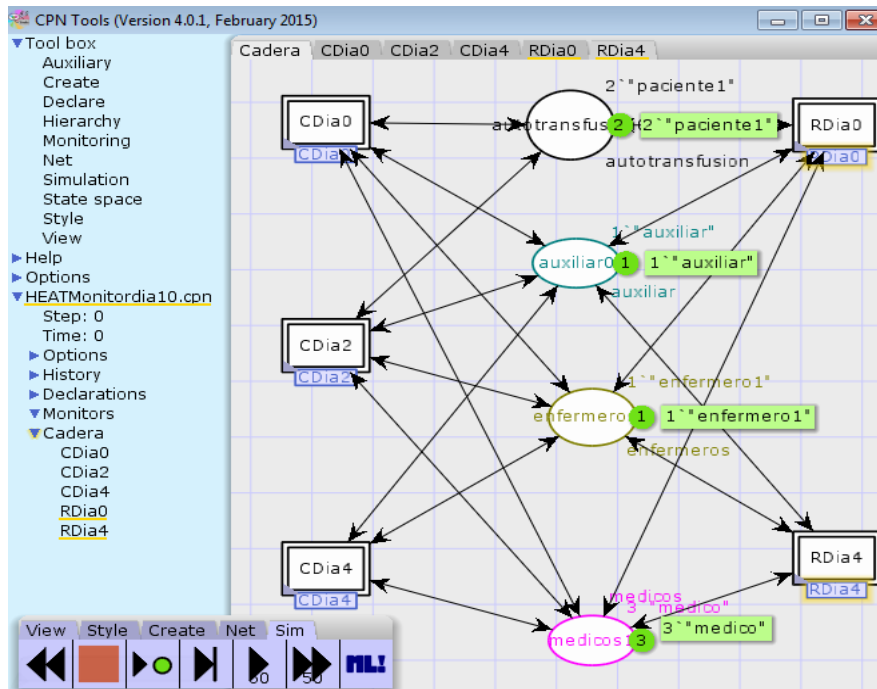


Figura 6.5: Día 10 modelado en CPNTools

La red de la fig. 6.5 contiene un paciente que se encuentra ingresado en el día4 de Cadera, otro paciente que se encuentra ingresado en el día4 de Rodilla, dos que se encuentran ingresados en el día2 de cadera, uno que ha ingresado en el día0 de Cadera y otro que ha ingresado en el día0 de Rodilla.

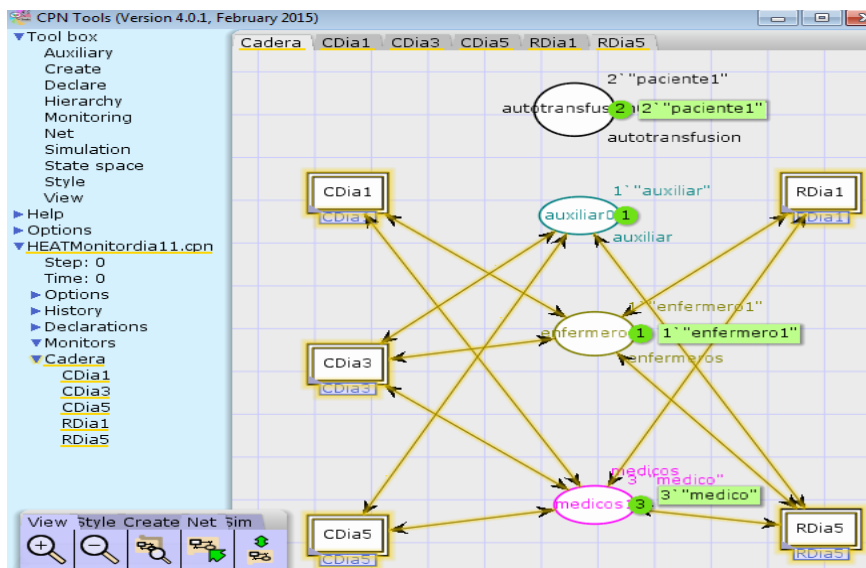


Figura 6.6: Día 11 modelado en CPNTools

La red de la fig. 6.6 contiene un paciente que se encuentra ingresado en el día5 de Cadera, otro paciente que se encuentra ingresado en el día5 de Rodilla, dos que se encuentran ingresados en el día3 de cadera, uno que se encuentra ingresado en el día1 de Cadera y otro que se encuentra ingresado en el día1 de Rodilla.

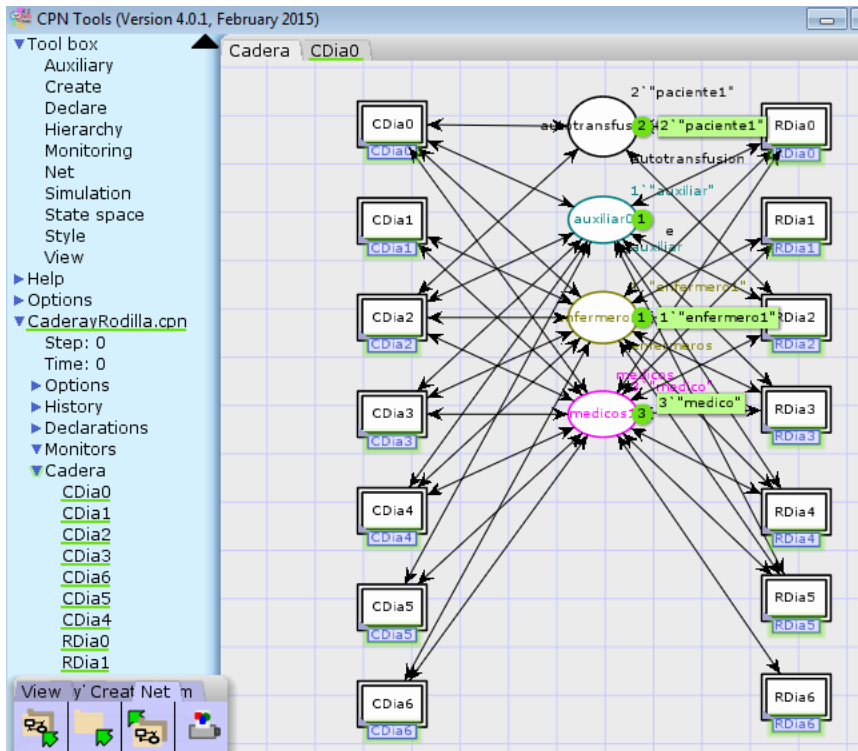


Figura 6.7: Vías clínicas de cadera y rodilla en paralelo modeladas en CPNTools

El modelo de la figura 6.7 está conformado por todos los días de las dos vías clínicas, en paralelo todos.