



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**

## Trabajo Fin de Grado

### Gestión hospitalaria utilizando el modelado, análisis y optimización de las vías y guías clínicas

Hospital management using modeling, analysis and optimization of clinical pathway and guidelines

Autor:

**Jose Benigno García Barreto**

Director/es:

**Cristian Mahulea**

**Jorge Albareda**

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura - EINA

2016





## 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<sup>a</sup>. \_\_\_\_\_,

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: \_\_\_\_\_



## Contenido

Resumen .....	3
Capítulo 1: Introducción .....	5
1.1. Enfoque del trabajo .....	5
1.2. Objetivo del trabajo .....	6
1.3. Alcance del trabajo .....	7
1.4. Fases en las que se ha realizado el trabajo .....	7
1.5. Organización del presente documento.....	8
Capítulo 2: Fundamentos teóricos .....	11
2.1. Fundamentos médicos.....	11
2.2. Fundamentos UML.....	12
2.2.1. Healthcare System Specification (HSS) .....	13
2.3. REDES DE PETRI, modelo matemático .....	14
Capítulo 3: Obtención del modelo.....	21
3.1. Obtención modelos UML .....	21
3.2. Utilización de HEAT para obtener modelo.....	23
3.3. Transformación modelo a modelo (Reglas de transformación) .....	25
3.4. Modelos utilizados .....	25
3.4.1. Modelo I.....	25
3.4.2. Modelo II.....	26
3.4.3. Modelo III.....	28
Capítulo 4: Simulaciones.....	31
4.1. Análisis estructural.....	31
4.2. Análisis por enumeración .....	31
4.3. Análisis dinámico.....	32
Capítulo 5: Conclusiones.....	37
Referencias.....	39
Anexo I: Catálogos.....	41
Anexo I.A Catálogo vías clínicas.....	41
Anexo I.B Catálogo de modelos HSS & Redes de Petri.....	48
Anexo II: Análisis basado en modelos formales.....	55
Anexo II.A Análisis estructural.....	55
Anexo II.B Análisis por enumeración.....	57

Anexo II.C	Método dinámico. Simulación .....	58
	Simulación Modelo I .....	58
	Simulación Modelo II .....	58
	Simulación modelo III.....	64
Anexo III:	Ampliación Fundamentos Teóricos.....	75
Anexo III.A	Vías Clínicas.....	75
A.1	Procesos y objetivos.....	76
A.2	Inconvenientes y/o dificultades:.....	77
Anexo III.B	Tipos de sistemas .....	77
Anexo III.C	Redes P/T .....	79
Anexo III.D	SWN (Stochastic Well-Formed Nets) .....	84
Anexo III.E	Redes temporizadas.....	86
Anexo III.F	Reglas de Transformación modelo a modelo .....	87

---

## Gestión hospitalaria utilizando el modelado, análisis y optimización de las vías y guías clínicas

---

### Resumen

El enfoque de sistemas de eventos discretos (SED) permite estudiar el comportamiento de muchos sistemas tecnológicos, por ejemplo, de manufactura, biológicos, de software o de tiempo real. Este Trabajo Fin de Grado pretende utilizar las herramientas de SED para la gestión -desde la perspectiva de control- de los servicios del sistema de salud. Para el análisis y control hacen falta modelos capaces de representar las características y los parámetros relevantes del sistema dinámico. La mayoría de los modelos actualmente utilizados consideran solo el flujo de información/pacientes dentro del sistema de salud. Los modelos considerados en esta propuesta tienen información acerca del uso de recursos en cada actividad de un tratamiento o cura.

Hoy en día se persigue la racionalización de recursos, tratando de obtener la excelencia clínica gastando el mínimo de recursos disponibles. Se empleará como ejemplos las vías clínicas de "Protocolo-Guía clínica artroplastia primaria de cadera" y "Protocolo-Guía clínica artroplastia de rodilla" utilizadas en el Hospital Clínico Universitario "Lozano Blesa" (HCU) de Zaragoza para el tratamiento de pacientes que estén dentro de la lista de espera quirúrgica.

Se va a participar de forma activa en la implementación de una herramienta en la cual los médicos puedan introducir de manera fácil los protocolos médicos y que tenga la posibilidad de verificar de forma automática algunas propiedades del sistema, como por ejemplo la predicción de la demora. El análisis y el diseño se basan en la utilización de modelos formales, por lo que es necesario tener un procedimiento interno automático de transformar los protocolos descritos en lenguaje de alto nivel a modelos matemáticos. La herramienta proporcionará soluciones para la mejora del protocolo que actualmente se está implementando a nivel del Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU.

El objetivo principal de la herramienta informática dentro del servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología es tratar de imponer los mismos tratamientos y curas (especificados en las vías clínicas) a todos los pacientes ingresados que sufran de la misma enfermedad o tienen que operarse de la misma patología. Por un lado, esto permite una mejor eficiencia en los tratamientos y por otro lado, los médicos están protegidos de cualquier consecuencia legal si, por desgracia, el paciente no responde bien a los tratamientos. La herramienta informática utilizará los modelos gráficos de un lenguaje de alto nivel, que es sencillo de manejar (Unified Modeling Language - UML), para monitorizar los pacientes ingresados.

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha participado en el diseño e implementación de una herramienta informática que satisfaga las necesidades del servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología de dicho hospital. La participación en la implementación de la herramienta no es como programador, ya que esa tarea ha sido encomendada a otra persona, más bien consiste en trabajar a la par con él en cuanto a ser la primera persona que trabaje con la herramienta, aportar ideas sobre su funcionalidad, etc. Al mismo tiempo, se ha utilizado la herramienta para obtener modelos UML de las dos vías clínicas mencionadas antes y también obtener modelos formales en forma de redes de Petri y utilizar estos modelos para analizar propiedades del sistema. Se hace mención que se ha participado activamente en la redacción de un artículo enviado a una conferencia internacional con revisión por pares de nombre "HEAT: A Tool to Develop, Analyze and Monitor Clinical Guidelines".

También cabe mencionar que el diseño de la herramienta es parte importante de una tarea del proyecto de investigación CICYT DPI2014-57252-R "Métodos y modelos formales para la gestión del servicio de salud" (<https://webdiis.unizar.es/GISED/projects/M2H/index.html>) en el que participa el hospital clínico junto con profesores del departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Zaragoza.



# Capítulo 1:

## Introducción

---

### 1.1. Enfoque del trabajo

A día de hoy, aunque parezca difícil de creer en muchos sectores de nuestra sociedad se sigue utilizando el papel como forma para almacenar datos y una recopilación e análisis de estos datos es muy tedioso. Estamos acostumbrados a escuchar hablar de nuevas tecnologías, de la utilización de herramientas informáticas que permitan modelar las formas de trabajo y datos referentes a una empresa, que hagan el trabajo de los empleados muchos más sencillos, etc. pero probablemente estos avances no están implementados en todos los sectores de trabajo.

Dentro del sector sanitario aragonés no hay un uso intensivo de recursos informáticos, con lo cual lo que se busca es establecer distintas herramientas que permitan sustituir el uso de papel y facilitar el trabajo del personal sanitario. Este trabajo fin de grado forma parte de un proyecto financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad que está siendo realizado de forma conjunta entre el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU y el área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Zaragoza (<https://webdiis.unizar.es/GISED/projects/M2H/index.html>). Dicho proyecto busca utilizar las vías clínicas como pilares en la gestión hospitalaria: optimización de recursos, evaluación de prestaciones, eficiencia y eficacia del sistema de salud, control de costes, etc. Para cumplir con este objetivo se añade a los datos propios de la vía clínica la información del uso de recursos, el uso de información médica (registro médico) y duración media para cada actividad clínica que aparece en dichas vías clínicas, con el fin de obtener modelos de sistemas de eventos discretos y usarlos de forma intensiva en el análisis de la situación real.

El punto de partida de este proyecto es la obsolescencia de los métodos de recopilación de datos e información utilizados en este servicio hospitalario. Hasta este momento el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología trabaja con distintos protocolos de actuación, llamados vías clínicas, que permiten realizar un tratamiento estándar a todos los pacientes que se vean sometidos a un determinado proceso hospitalario; el problema radica en que no hay ninguna constancia de que los procesos se vayan cumpliendo adecuadamente ya que no se dispone de una base de datos que nos permita almacenar esta información, asimismo, los datos de eficiencia de cada protocolo que se pueden hacer son muy básicos ya que ahora mismo sólo se lleva un control sobre si el protocolo ha terminado o no.

Partiendo de esta idea inicial, el área de Ingeniería de Sistemas y Automática está desarrollando un proyecto para la generación de una herramienta, requerida por el jefe del servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del hospital en cuestión, en el cual se encuentra englobado el presente TFG. El proyecto consiste en implementar una herramienta que facilite distintas facetas del trabajo de los médicos; las facetas que mejoraran con esta herramienta serán:

- Informatización en la utilización de las vías clínicas del servicio mediante una herramienta sencilla.

- Una fuente actualizada de información acerca de los rendimientos en la cumplimentación de dichas guías.
- Base de datos actualizada en tiempo real con todos los pacientes tratados que permitirá buscar un rendimiento óptimo y una constante búsqueda de mejora.
- Supervisar las distintas secciones, grupos de trabajo establecidos.
- Monitorizar del proceso ya que con esta herramienta el personal médico irá marcando como realizada/no realizada cada actividad del proceso.
- Base de datos que permitirá tener información referente a tiempos medios de cada actividad, probabilidades de fallo de cada protocolo, probabilidad de éxito sin incidencia.
- Esta herramienta servirá como forma de llevar un control de los motivos por los que un paciente no ha llegado a completar cada proceso.

En este trabajo nos centraremos en el análisis de dos vías clínicas, “*Protocolo-Guía clínica artroplastia primaria de cadera*” y “*Protocolo-Guía clínica artroplastia de rodilla*”, que se adjuntan en el ANEXO I y se trabajará en hacer un análisis inicial de estas dos guías clínicas; cabe destacar que este trabajo establece una línea de trabajo importante ya que una vez puesta en funcionamiento la herramienta (actualmente se ha instalado una primera versión en los ordenadores del HCU y está en prueba por algunos médicos), de nombre HEAT, se podrán obtener datos reales que nos lleven a un mejor análisis. El primer análisis propuesto en éste trabajo se hará sobre dichas vías clínicas considerando duraciones de actividades dadas por el personal médico ya que aún no se disponen de datos reales recopilados por la herramienta; por esta razón los datos que se obtendrán tras el uso de la herramienta durante un determinado tiempo permitirán mejorar el análisis si otra persona continua este TFG.

## 1.2. Objetivo del trabajo

Los objetivos del presente Trabajo Fin de Grado consisten en:

- Crear un catálogo de vías clínicas hospitalarias modeladas en un lenguaje UML.
- Transformar los modelos UML obtenidos a modelos matemáticos (redes de Petri).
- Análisis y optimización de recursos utilizando las redes de Petri.

Con este trabajo, como se ha dicho en la introducción, se da un primer paso de cara al análisis de los protocolos que se siguen en el servicio hospitalario. Sería ideal tener un catálogo amplio de vías clínicas pero hasta el momento son las únicas vías clínicas que han sido sometidas a la revisión y aceptación de todos los médicos perteneciente al servicio. El funcionamiento de las vías clínicas es el de un sistema concurrente (en el anexo III. B aparece una definición de los sistemas con los que se trabajan) y los diversos modelos con lo que se trabajaran se explicaran en el capítulo 3.

El primer paso es obtener un modelo de alto nivel, gráfico, de las vías clínicas, con lo cual se trabajara con el lenguaje UML, el cual permitirá modelar las actividades a realizar. Para poder especificar el uso de los recursos y la comunicación entre varias vías clínicas, el modelo UML se ha extendido definiendo un perfil llamado *Healthcare System Specification* (HSS) [1]. Obtener los modelos HSS de las dos vías clínicas ha sido la primera tarea de este trabajo tal que a partir de las vías clínicas proporcionadas por el hospital (anexo I.A) se ha conseguido obtener dichos modelos HSS (anexo I.B). A partir de estos modelos HSS, la herramienta HEAT, realizará la conversión a un modelo matemático, en concreto, redes de Petri que nos permitirán analizar distintas propiedades del sistema de salud.

El análisis sería más fiable si se tuvieran datos concretos referentes a tiempo de diferentes actividades y las probabilidades de que se suceda cada una de ellas; al no tener una base de datos,

esos valores no son muy realistas, pero se está proporcionando una metodología de análisis que después de recoger datos del sistema, el análisis se mejorará.

El objetivo global de este TFG es proporcionar una metodología para la gestión del servicio hospitalario basado en la exploración de las vías clínicas utilizadas por los médicos. Al mismo tiempo, con la metodología propuesta se ampliará un análisis inicial para contribuir a la mejora del sistema de trabajo desarrollado actualmente en dicho servicio hospitalario. La mejora del sistema lleva implícito la consecución de objetivos importantes para este servicio quirúrgico, porque por ejemplo se podría hacer una estimación del tiempo que costaría tratar un número determinado de pacientes que estén en la Lista de Espera Quirúrgica (LEQ) o el número de secciones necesarias de trabajo para intentar que el número de pacientes tratado sea el máximo, etc. Por otro lado, el personal médico va a utilizar la herramienta informática para poder monitorizar los pacientes ingresados que siguen la vía clínica y facilitará las revisiones de las vías en un futuro porque se guarda en la base de datos toda la información de los pacientes.

### **1.3. Alcance del trabajo**

En cuanto al alcance del trabajo, como se ha dicho, se intentará conseguir unos resultados válidos provenientes del análisis de un modelo que refleje el sistema que se sigue en el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU. Es importante dejar claro que este trabajo tiene una línea de trabajo en el futuro muy interesante ya que conforme la herramienta vaya recopilando datos tras los primeros meses desde su puesta en marcha los análisis serán más realistas y la representación del modelo se ajustará de manera más adecuada a la realidad.

Asimismo se hace referencia que se ha participado en un artículo sobre la herramienta HEAT, llamado: "*HEAT: A Tool to Develop, Analyze and Monitor Clinical Guidelines*" enviado a la conferencia ICNSC "*International Conference on Networking Sensing and Control*" que tendrá lugar en *Calabria, Italia* en Mayo del 2017 (la primera versión de este artículo se puede consultar utilizando el siguiente enlace:

[http://webdiis.unizar.es/~cmahulea/papers/2016\\_ICSTCC\\_hss.pdf](http://webdiis.unizar.es/~cmahulea/papers/2016_ICSTCC_hss.pdf)).

La implementación de los distintos códigos de la herramienta se ha llevado a cabo por Luis Parrilla, ingeniero informático, contratado por el proyecto para esta implementación. Las tareas asignadas a mí dentro del equipo de trabajo del proyecto han sido de modelado UML de las vías clínicas, manejar la herramienta introduciendo los modelos UML para plantear mejoras y obtener modelos formales, definir indicadores médicos sobre el modelo de red de Petri y analizar su evolución por simulación en distintos escenarios.

### **1.4. Fases en las que se ha realizado el trabajo**

Como se menciona en la propuesta de este TFG el cronograma a seguir ha sido la siguiente:

- Realizar un catálogo de modelos UML de los protocolos utilizados en el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU. El catálogo está compuesto por dos vías clínicas, que se han modelado en lenguaje UML; el modelo UML completo de cada vía clínica aparece en el ANEXO I.B

- Transformaciones de los modelos UML a modelos formales (matemáticos), en concreto, a redes de Petri coloreadas *Stochastic Well Formed Net* (SWN) y redes de Petri Generalized Stochastic Petri Nets (GSPN). En el siguiente capítulo introduciremos estos modelos matemáticos que nos permiten analizar una situación real mediante su simulación.
- Simulación y verificación de protocolos; si bien es cierto que la herramienta HEAT nos da las redes de Petri que deseamos, ya sea coloreada o no, tenemos que comprobar que las redes de Petri no presentan fallos estructurales; una vez hecha esa comprobación se procede a la búsqueda del modelo adecuado que refleje la situación diaria que se da en el hospital; ha sido necesario entender el proceso de transformación de modelo a modelo, del cual se darán unas pinceladas en el capítulo 3. Para terminar con la descripción de esta parte del trabajo, utilizando las redes obtenidas de HEAT se procede a obtener el modelo global trabajando con dos herramientas informáticas TimeNet y GreatSPN. Estas dos herramientas se han ido utilizando indistintamente y se puede decir que el coste computacional de TimeNet es menor en la mayoría de cálculos, pero se fueron utilizando según las necesidades que se presentaban.
- Evaluación de prestaciones por simulación. Cuotas de rendimiento; se han ido realizando diversas simulaciones hasta llegar a simulaciones que se ajusten a la realidad y que reflejen la situación diaria que se presenta en el hospital. En cuanto a los rendimientos lo que se ha hecho es definir diferentes medidas interesantes que nos aportan información sobre la evolución del sistema, por ejemplo: probabilidades de terminar satisfactoriamente protocolos o actividades diarias, etc.
- Definir propiedades del sistema de salud y analizarlas utilizando el modelo formal; una vez definidas las medidas interesantes para el análisis se obtienen datos que nos permiten sacar conclusiones de una situación asemejable a la realidad y que se puede mejorar con distintas medidas. Aquí entra el punto de que un análisis posterior con datos concretos que recogerá HEAT con el paso del tiempo permitirá hacer un análisis realista y que permita implementar medidas que mejoren el funcionamiento del departamento de Traumatología.
- Integrar los algoritmos en una herramienta que se utilizará en el servicio, esta parte es una de las diferentes vías que se puede seguir a partir de este Trabajo Fin de Grado; la primera versión de la herramienta ha sido instalada en los ordenadores del servicio médico y por eso queda trabajo por realizar, pero si bien no se ha programado nada, se ha trabajado sobre dicha herramienta en su mejora, mediante su utilización antes de que sea puesta en marcha en el hospital.

### 1.5. Organización del presente documento

La presente memoria está dividida en cinco capítulos. El primer capítulo trata de introducir de una forma genérica el Trabajo Fin de Grado y una explicación de las distintas etapas que han tenido lugar para llevarlo a cabo.

El capítulo dos se centra en la explicación de los fundamentos teóricos de los tres temas que se abarcan en el presente trabajo (vías clínicas, en el plano médico, diagrama de actividades en lenguaje UML y redes de Petri); la explicación se intenta que sea didáctica con ejemplos de diferentes temas que pertenecen al desarrollo del trabajo, se pretende que la explicación sea sencilla y además se adjunta una ampliación formal del tema en los anexos, en donde se pueden encontrar demostraciones, etc.

El tercer capítulo de esta memoria se centra en el proceso de obtención del modelo u modelos con lo que se van a trabajar y los cuales se van a analizar; hay una explicación detallada de lo que representa y lo que buscamos con ellos. El capítulo cuarto y como continuación del anterior reflejará las simulaciones hechas, haciendo una explicación de los resultados obtenidos, las simulaciones en

detalle se verán reflejadas en el anexo II; además se incluye una explicación del tipo de simulación o análisis realizado y el programa u programas utilizados con los costes computacionales empleados en la obtención de resultados.

Finalmente, se ha elaborado un quinto capítulo en el que se recogen las conclusiones del trabajo y se plantean ideas de cara a futuros estudios.



# Capítulo 2:

## Fundamentos teóricos

---

### 2.1. Fundamentos médicos

Los equipos médicos que trabajan en un hospital siguen durante cada día protocolos de actuación o vías clínicas. Para cada enfermedad, operación o procedimiento médico existe una guía clínica que describe la secuencia de tratamientos, análisis médicos y el flujo de trabajo que el paciente debe seguir.

La vía clínica es una herramienta de gestión clínica para facilitar la atención sistemática del paciente. Pueden desarrollarse para la atención antes, durante y/o después de la hospitalización [2], [4]. En el caso de las vías clínicas seguidas en el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU estas abarcan los tres espacios temporales centrándose en los días y cuidados necesarios durante la hospitalización, y permiten la anticipación de los problemas surgidos durante el desarrollo de actividades, la evaluación de los objetivos planteados, la comparación con los estándares de atención definidos previamente y la innovación en las soluciones.

El uso de la guía clínica, se llamará indistintamente vía o guía clínica, es doble: asegurar el mismo tratamiento médico y cuidados para cada paciente y proteger a los médicos u cualquier personal sanitario contra algún problema legal [3].

Por otro lado, la calidad de los indicadores del hospital depende de la efectividad de la guía clínica que se usa en el tratamiento de pacientes. Es importante que el rendimiento de aplicación de las guías clínicas (los pacientes que verdaderamente siguen la guía sin desviación alguna) no decrezca por eso, estas vías deben estar en constante revisión para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. Pero este no es el único factor a considerar, coste y tiempo empleado son indicadores relevantes; esta razón hace que el equipo médico que dirige el hospital esté interesado en el coste y recursos necesarios en cada actividad (coste de examen necesario/innecesario, alternativas con la misma eficiencia, etc.).

Los objetivos de la gestión sanitaria son:

- Atender al paciente con la mejor calidad posible;
- Manteniendo la calidad de la asistencia sanitaria buscar que los costes económicos sean los menores posibles.

La forma de conseguir dichos objetivos es realizar única y exclusivamente los procedimientos necesarios para tratar de forma adecuada al paciente. Para lograr esto lo que se hace es:

- Sistematizar la asistencia de los procesos y la mejor forma de hacer esto es aplicando una vía clínica, que garantiza la misma atención a todos los pacientes que presenten la misma patología.
- Realizar todos los actos médicos necesarios para la perfecta atención del paciente sin olvidar ninguno además de no realizar ningún acto médico que no sea necesario para la atención del paciente. Estos actos innecesarios producen además de un aumento de los costes del proceso, un peligro añadido de efectos no deseados en el paciente.

Este es el sistema actual que se sigue en el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU y lo que se pretende con la herramienta HEAT es sustituir la representación matricial (se especifica en el anexo III) por un modelo UML, en el que se represente mediante diagrama de actividades las vías clínicas.

Las vías clínicas con las que se trabajaran en el presente Trabajo Fin de Grado aparecen en el anexo I.

## 2.2. Fundamentos UML

*Unified Modeling Language* (UML) o lenguaje de modelado unificado [5] se basa en la orientación a objetos en el campo de los lenguajes de programación. En un lenguaje de programación la descripción de los objetos se realiza de manera formal, con una sintaxis rigurosa, la cual resulta ilegible para los no programadores y difícil de descifrar para los programadores. En los años 80 y principios de los 90 se empezaron a utilizar lenguajes gráficos para representar abstracciones; existían diferentes notaciones, con lo cual, entre 1994 y 1995 James Rumbaugh, Graddy Booch y Yvar Jacobson deciden unificar sus notaciones y surge la versión 1.0 de UML, que se publica en 1997. Con el paso de los años este lenguaje se ha ido ampliando y sofisticando hasta llegar en 2011 a UML versión 2.4.

UML está compuesto por diversos elementos gráficos que se combinan para conformar diagramas [6]. UML abarca varios tipos de diagramas que permiten especificar un sistema con diferentes puntos de vista (Diagrama de clases, Diagrama de objeto, Diagrama de casos de uso, Diagrama de estados, Diagrama de Actividades entre otros). Para modelar las vías clínicas, utilizamos los *diagramas de clases* y los *diagramas de actividades*.

**Diagramas de clases.** Los diagramas de Clases [7] describen la estructura estática de un sistema, en términos de clases y asociaciones. Una clase describe un conjunto de objetos con estructura, comportamiento, relaciones y semántica similar, en nuestro caso, usamos diagrama de clases para especificar los *recursos del hospital* y la *información sanitaria del paciente*. Cada clase presenta atributos a los que se le asigna valores específicos, como ejemplo, en el caso del paciente los atributos serían número de historia clínica, fecha de nacimiento (edad del paciente), patología, fecha de hospitalización, etc.; en el caso de los médicos el atributo sería la sección a la que pertenece.

**Diagramas de actividades.** Se puede definir a los diagramas de actividades como grafos directos que se usan para mostrar la secuencia y concurrencia de acciones [5]. Se utilizan los diagramas de actividades para modelar las vías clínicas, las cuales describen los tratamientos y cuidados que los pacientes con una misma patología tienen que seguir, y como un paciente no puede seguir más de un tratamiento en un momento dado, en este trabajo se utiliza solo la visión secuencial de estos diagramas. En los diagramas de actividades se puede especificar tanto el flujo de control como el flujo de objetos. Un flujo de control muestra el orden de ejecución de las acciones dentro de una actividad, en lo que respecta a las vías clínicas el orden secuencial en el que se desarrollan las distintas actividades.

Una actividad es una serie de acciones; una acción consiste en asignar un valor a un atributo, crear o destruir un objeto, efectuar una operación, enviar una señal al otro objeto o a uno mismo, etc. Las acciones se denotan por rectángulos con las puntas redondeadas (por ejemplo el rectángulo

definido como (b) en el diagrama de actividades de la Figura 1). La actividad inicial es la primera en ejecutarse y se representa con un punto negro (el nodo (a) en la Figura 1), mientras la actividad final representa el término de la ejecución de las actividades de un diagrama se representa con un punto rodeado de un círculo (el nodo (e) en la Figura 1); dicha actividad final no tiene por qué ser única y tampoco es obligatoria.

Un encadenamiento de actividades es un vínculo orientado entre dos actividades, se traspasa cuando concluye la actividad de la que procede, lo que conduce a la actividad a la que se dirige. Los encadenamientos utilizados para modelar las vías clínicas son: (i) una secuenciación, que indica la siguiente actividad especificada en el nodo de salida; (ii) una unión, representada como un diamante usado para unir varios caminos (nodo (d) en la Figura 1); (iii) una decisión que se representa también en forma de diamante (nodo (c) en la Figura 1).

La Figura 1 muestra el diagrama de actividades correspondiente al día uno de la vía clínica “*Protocolo-Guía clínica artroplastia primaria de cadera*” y en ella se puede ver los elementos de diagramas de actividades utilizados para su modelado. En cuanto a nuestros modelos cada día que conforma la vía clínica incluye un conjunto de actividades (de tratamientos y cuidados) que necesitan ser llevados a cabo con un orden temporal establecido.

### 2.2.1. Healthcare System Specification (HSS)

En la herramienta HEAT se utiliza un perfil UML, llamado *Healthcare System Specification* (HSS), para modelar las vías clínicas. Se partió desde una vía clínica definida usando los elementos básicos de diagrama de actividades (UML) que son fáciles de entender por el personal sanitario y se amplió la semántica de dichos diagramas UML para especificar tres aspectos esenciales que reflejan las guías clínicas: (i) flujo de pacientes, (ii) utilización de recursos e (iii) intercambio de información.

El perfil HSS añade un nuevo elemento con respecto a los diagramas de actividades estándares llamado *etiquetas* (los nodos (f) en la Figura 1), que se representan por un rectángulo con un borde doblado, vinculado los componentes de diagrama con una línea discontinua. Estas etiquetas pueden especificar sólo algunas anotaciones de una actividad o dar una propiedad especial vinculada a un componente del diagrama (es decir, una etiqueta añadida a una encadenamiento que sale desde una elección puede ser usada para especificar las probabilidades de la decisión, para reflejar el cambio de recurso utilizado en dicha actividad, mientras que una etiqueta añadida al nodo inicial puede ser usada para especificar el número de pacientes esperando ser tratados).

La Figura 1 muestra un ejemplo de modelo HSS donde se puede observar:

- (a) Nodo inicial: representa el inicio de la guía clínica;
- (b) Nodo actividad: representa una actividad;
- (c) Nodo elección: modela una toma de decisiones con varios caminos;
- (d) Nodo unión: usado para unificar varios caminos;
- (e) Nodo final: modela el final de la vía clínica.

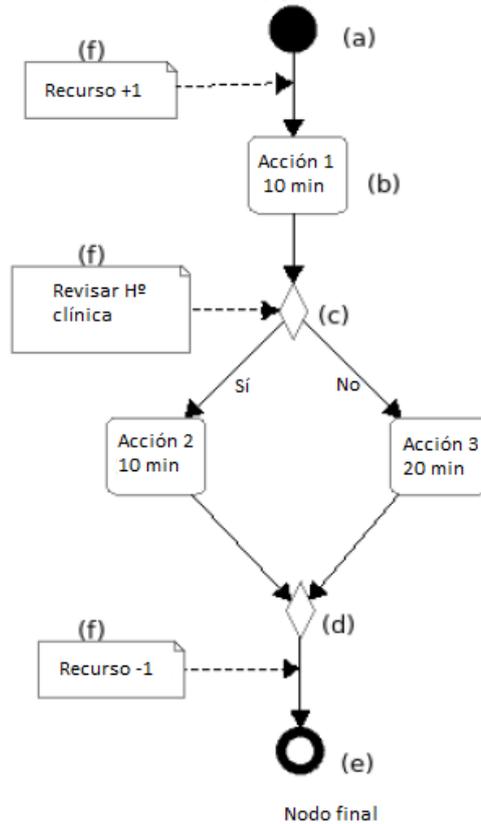


Figura 1: Ejemplo modelo HSS

### 2.3. REDES DE PETRI, modelo matemático

El modelo UML de las vías clínicas se transforma en modelos de redes de Petri de alto nivel denominadas Stochastic Well-Formed Nets (SWN) [9], [13]. Es necesario utilizar redes de alto nivel si se quiere establecer una diferencia entre las distintas marcas que representan a los pacientes, médicos o enfermeras. Una SWN es una extensión de las redes coloreadas que permite crear una representación más compacta y paramétrica de un sistema discreto.

La mayor diferencia con respecto a las redes de Petri sin colores es que en una SWN las marcas tienen propiedades, llamadas colores, y es posible establecer una diferencia entre ellos. La definición de los componentes de una SWN se puede ver en el Anexo III.D. Aquí vamos a considerar un ejemplo.

La Figura 2 muestra una SWN que modela un conjunto de actividades del día 0 de la vía clínica de artroplastia de cadera que se ha obtenido por transformación modelo-a-modelo desde la vía clínica en HSS. La parte izquierda de la imagen refleja las clases de colores de la SWN, en la que se dispone de dos clases: dPatients y dMedico. Dicha red de Petri engloba varias extensiones de redes de Petri P/T (Anexo III.C):

(a) Cada arco tiene una inscripción que es una variable a la que se le tiene que asignar un valor durante el disparo de la transición de entrada o de salida. En la red de la Figura 2, los arcos van asociados a una variable  $vMedico$  o  $vPatients$ ; para que se dispare la transición  $t_5$  es necesario que tanto la variable como  $vMedico$  y  $vPatients$  se asocia a una marca.

(b) Arcos inhibidores, los cuales se usan para la lógica negada. Las transiciones  $t_9$  y  $t_{10}$  están conectados al lugar AutoT que refleja los pacientes que se han sometido al proceso de autotransfusión:  $t_9$  se puede disparar cuando la condición es verdadera, es decir, si el paciente del lugar  $p_8$  está también en el lugar de AutoT (esto se asegura utilizando la misma variable  $vPatients$  en los arcos ( $p_8, t_9$ ) y (autotransfusión,  $t_9$ )).  $t_{10}$  se puede disparar cuando la condición es falsa, es decir cuando el paciente del lugar  $p_8$  no está en el lugar de AutoT.

(c) transiciones temporizadas que modelan las distintas actividades según una distribución de probabilidad exponencial. Las transiciones temporizadas se representan gráficamente por casillas blancas y se caracterizan por tener prioridad cero. Los niveles de prioridad mayores que cero se reservan, en cambio, para transiciones inmediatas, representados gráficamente como cajas negras finas;  $t_{13}$  es una transición temporizada con valor medio de actividad de 2 min y  $t_7$  presenta una duración media de 20 min. Los lugares se dibujan como círculos y representan una variable de estado del sistema.

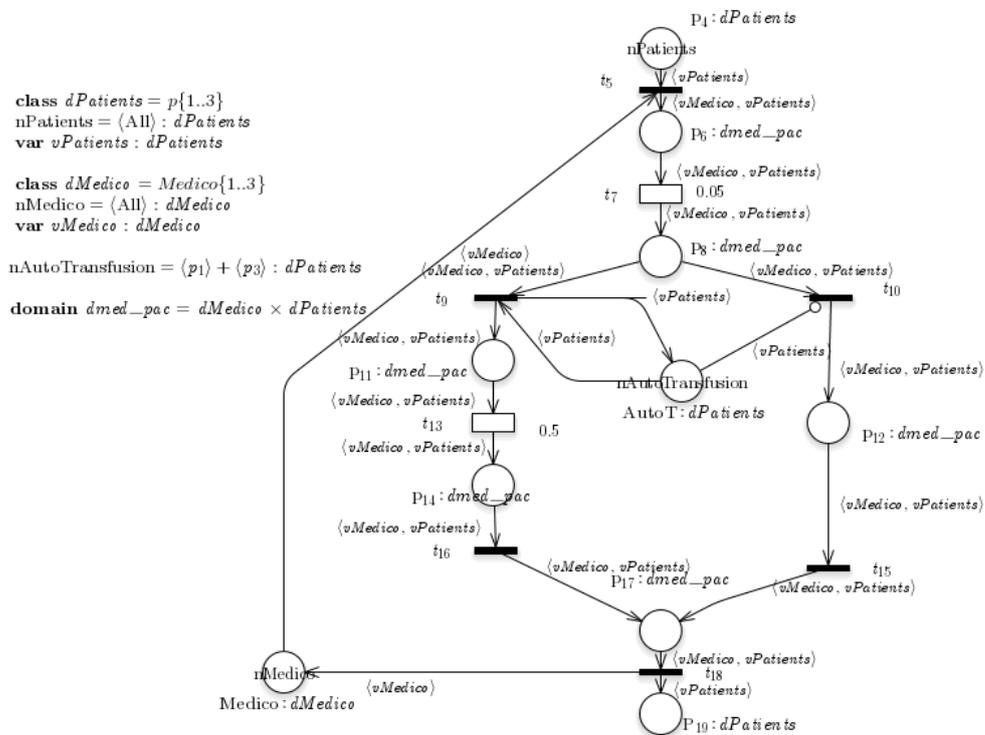


Figura 2: SWN obtenida aplicando reglas de transformación a partir del modelo HSS

La red SWN de la Figura 2 consiste en:

- La red contiene 10 lugares. Hay dos lugares que modelan recursos compartidos: lugar Medico (parte izquierda de la figura) y lugar AutoT (situado entre la secuencia de actividades paralelas). Los otros lugares modelan actividades que pueden ser de tratamiento o de espera.
- 8 transiciones, de las cuales dos son transiciones temporizadas ( $t_7, t_{13}$ ) y su ratio, inversa de su valor medio, se sitúa a la derecha de la transición.
- En cuanto a las clases de colores en el ejemplo se pueden apreciar dos:  $dPatients = \{P_1, \dots, P_n\}$ ;  $dMedico = \{Medico_1, \dots, Medico_n\}$ . De esta forma, cada paciente y recurso se puede diferenciar.

- Cada uno de los lugares presenta un dominio, que se expresa como el producto cartesiano de las clases que intervienen en cada lugar (se pueden ver los dominios propios de cada lugar en la parte izquierda de la Figura 2) representando los tipos de marcas que se pueden almacenar.
- $M_0$  es la función de marcado inicial que asigna a cada lugar un dominio de color o un parámetro; en la imagen se puede ver que el marcado inicial presenta un marcado nPatients, que engloba los tres pacientes, en el lugar  $p_4$ . El lugar Médico y el lugar AutoT también presenta un marcado inicial como se puede ver en la imagen.

En la Figura 3 se puede ver los el estado anterior y posterior al disparar la transición  $t_{10}$ . Para que dicha transición se dispare es necesario que el lugar  $p_8$  disponga de una tupla formada por dMedico y dPatients, en el caso de la figura  $\langle Medico_0, P_2 \rangle$  con lo cual la SWN nos está dando información acerca del médico utilizado para cumplir una determinada actividad sobre un paciente en concreto; debido a que el paciente  $P_2$  no había sido sometido a autotransfusión se dispara  $t_{10}$  y no  $t_9$ . El estado final, una vez disparada dicha transición se refleja en la parte derecha de la imagen.

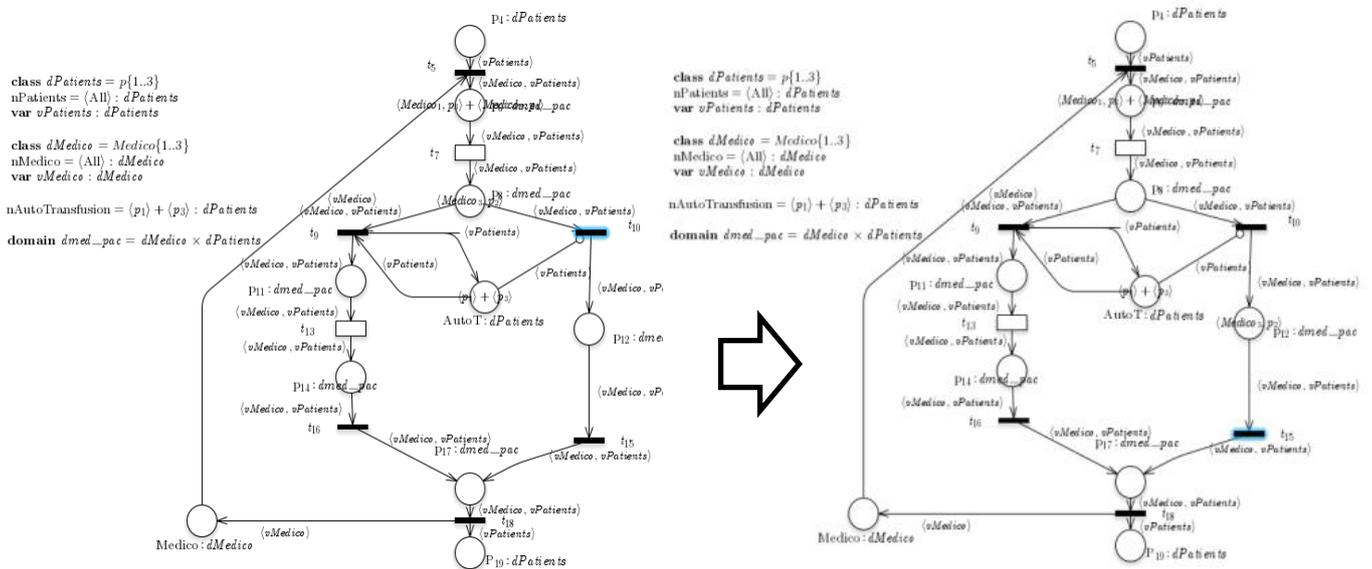


Figura 3: Disparo transición en red SWN

Los análisis que se pueden abordar sobre una red SWN son: análisis utilizando el grafo de alcanzabilidad, en cuanto análisis estático, y análisis por simulación para un análisis dinámico. Debido al tamaño de los modelos utilizados, normalmente el número de pacientes a tratar es muy grande y ello implica que el número de estados alcanzables sea elevado, no se puede realizar un análisis mediante el grafo de alcanzabilidad, como se verá en el capítulo 4, y siguiendo esta línea una simulación de redes coloreadas teniendo unos modelos tan grandes dificulta la obtención de resultados por lo que se introducen distintas facetas en forma de General Stochastic Petri Nets (GSPN), como herramienta para llevar a cabo un análisis de los modelos; es importante recalcar que un modelo GSPN aporta menos información si lo comparamos con una SWN, pero como ventaja presenta su menor complejidad.

Como se puede ver en la Figura 4 ya no se dispone información del recurso utilizado y del paciente que se trata en cada lugar; la GSPN presenta transiciones temporizadas e inmediatas, y al igual que en el modelo anterior una transición temporizada modela el desarrollo de una actividad hospitalaria. Cada acción desarrollada se modela con una variable de estado que se representa por

un lugar, con lo cual disponemos de 9 variables de estados de las cuales una de ellas es un recurso compartido (médico). Las marcas se representan como puntos negros; en la imagen se aprecia el marcado inicial para dicha red de Petri, el cual va cambiando con cada transición que se dispara.

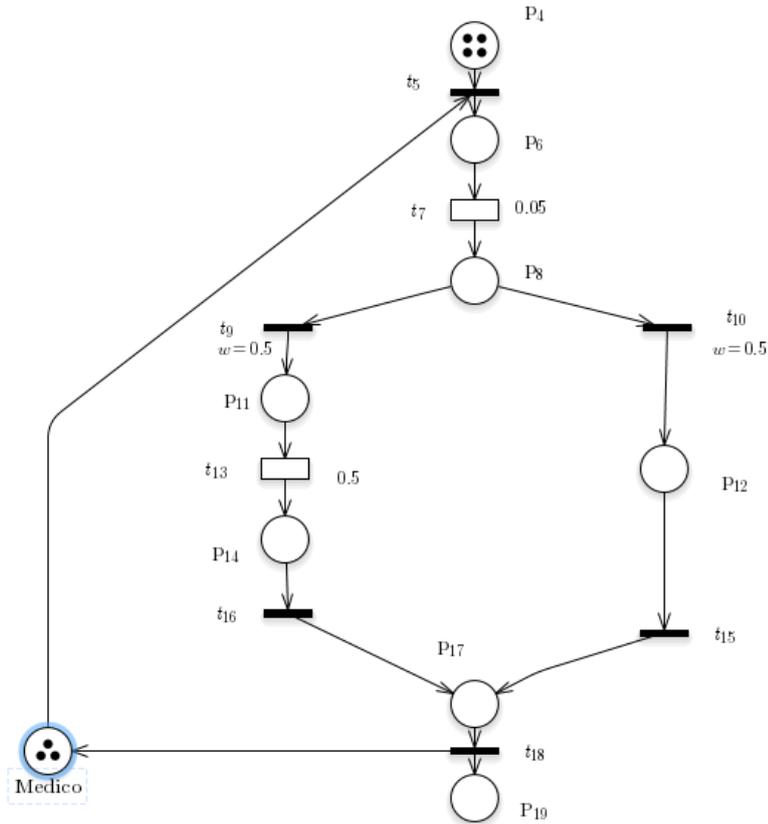


Figura 4: Ejemplo de una SPN

Se puede dar la situación de que el lugar Medico este vacío con lo cual dicha situación refleja que los tres médicos disponibles estén ocupados. Otra diferencia respecto al modelo coloreado es que la información sanitaria, pacientes que han sido sometidos a autotransfusión, no se puede utilizar ya que es necesario que cada marca sea diferente al modelar un paciente, mientras que en una GSPN las marcas no incorporan ninguna información y son iguales. En esta imagen se puede apreciar que las transiciones con distinto peso (0,5 en este caso) sirven para modelar una situación de conflicto.

La Figura 5 muestra la situación de que no haya recursos disponibles y la resolución del conflicto mediante el disparo de la transición  $t_9$  en la que la marca puede seguir indistintamente uno de las dos secuencias de actividades según los pesos de las transiciones. Cabe destacar que para el disparo de  $t_5$  hace falta por lo menos una marca en  $P_4$  y una marca en el lugar médico.

En los anexos III.C y III.D se puede encontrar una definición formal y una ampliación de la información aportada en este apartado.

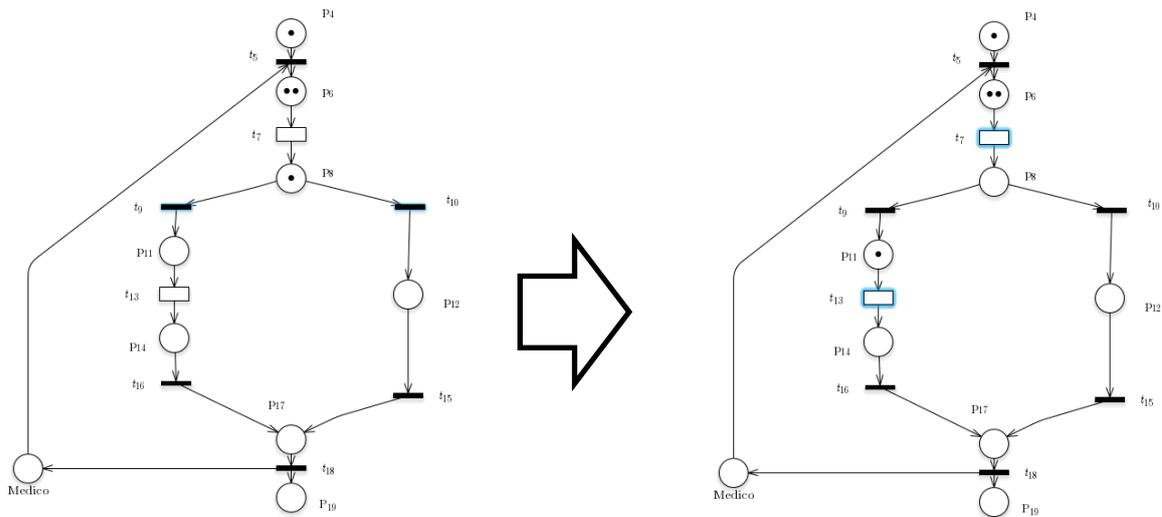


Figura 5: Disparo de una transición SPN

Una SWN no nos permite hacer un análisis estructural ya que este se realiza con la ayuda del álgebra lineal y es independiente del marcado inicial; se verifica que el modelo sea consistente y conservativo, mediante los P- y T- semiflujos. Para el análisis estructural [15] es necesario utilizar la ecuación de estado y en una SWN es difícil de obtener con lo cual se explica el análisis estructural de una RdP P/T, la cual se explica en el Anexo III.C; dicho anexo incluye la definición formal de RdP P/T y una explicación amplia de ellas.

Algunos elementos estructurales de una red de Petri P/T son:

a) Ecuación de estado

$$M = M_0 + C \cdot \sigma$$

Nos permite calcular el marcado alcanzado  $M$  desde el marcado inicial  $M_0$  disparando las transiciones del vector de disparo  $\sigma$ .

b) P-semiflujos son anuladores izquierdos no negativos de la matriz de incidencia  $C$ . (un vector  $y \geq 0$  es un P-semiflujo si  $y \cdot C = 0$ )

Premultiplicando la ecuación de estado por un P-semiflujo, obtenemos una ley invariante (una relación lineal entre las variables del marcado que permanece cierta en todos los estados alcanzables).

$$y \cdot m = y \cdot m_0 + y \cdot C \sigma \rightarrow y \cdot m_0 = cte$$

c) T-semiflujos son anuladores derechos no negativos de  $C$ . Así que un vector  $x \geq 0$  es un T-semiflujo si  $C \cdot x = 0$ .

Sustituyendo  $\sigma$  por un T-semiflujo  $x$  en la ecuación de estados, si había una secuencia disparable con un vector contador de disparos, vemos que este corresponde a una secuencia repetitiva.

$$m = m_0 + C \cdot x = m_0$$

La existencia de P/T-semiflujos proporciona información interesante acerca del comportamiento del sistema. Si existe un P-semiflujo  $y > 0$  entonces la red es conservativa. El estado

conservativo asegura la acotación estructural. Además, la red es consistente si existe un T-semiflujo  $x > 0$ . Un sistema que es vivo y acotado debe de ser consistente, ya que un marcado obtenido mediante el disparo de una secuencia repetitiva que contiene todas las transiciones corresponde a un T-semiflujo positivo. Las características estructurales de una RdP P/T se especifican en el anexo III.C.



---

# Capítulo 3:

## Obtención del modelo

---

La Figura 6 muestra las diferentes formas que se pueden utilizar para analizar un sistema:

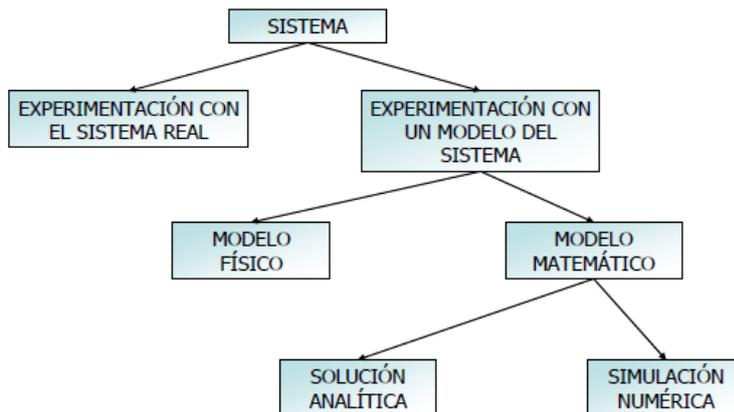


Figura 6: Estructuración en proceso de análisis de un modelo

En este trabajo se utiliza el análisis basado en modelo matemático. Una vez que se ha construido un modelo matemático, que representa el sistema a estudiar, se debe analizar cómo utilizar este modelo para resolver las incógnitas sobre el sistema. Si el modelo matemático es sencillo se podrá resolver analíticamente, obteniendo una solución exacta a dichas incógnitas; si el modelo es complejo o inabordable, habrá que recurrir a su simulación, que consiste en proporcionar una serie de valores a determinadas variables de estado y calcular cuál es el valor resultante para el resto de las variables. De este modo, se obtiene una representación o muestra de las posibles respuestas de modelo (y, por tanto, del sistema que representa) ante distintas condiciones de partida (distintos escenarios).

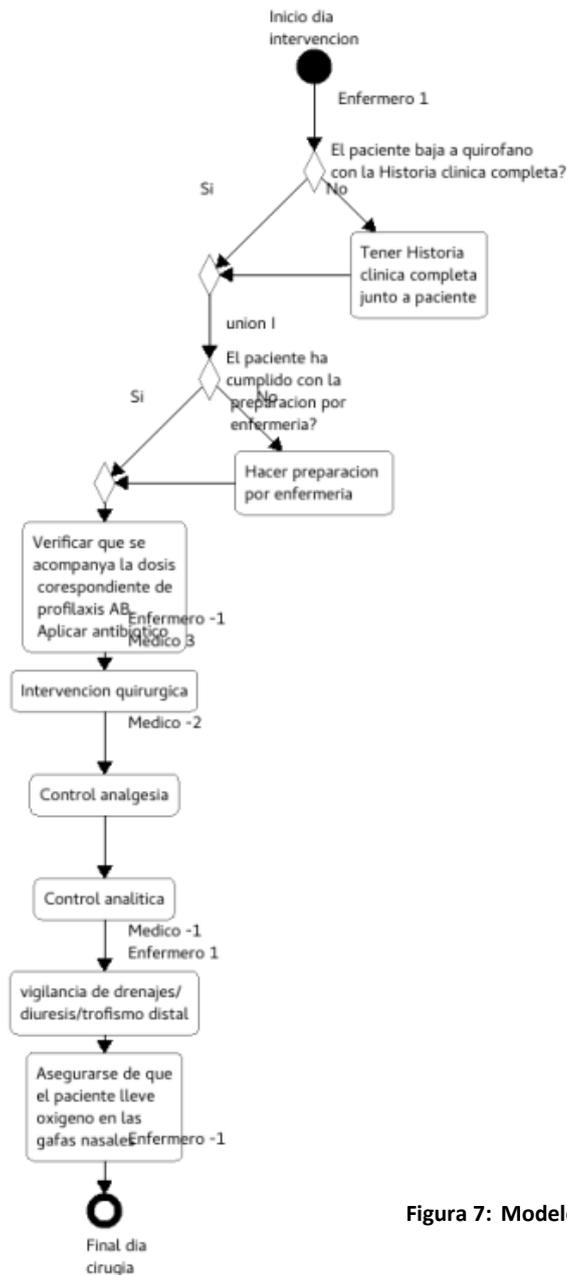
### 3.1. Obtención modelos UML

El primer paso a seguir en el desarrollo de este TFG es obtener los modelos UML partiendo de unas vías clínicas en formato texto (se adjuntan en el anexo I.A). Los modelos se obtuvieron tras varias reuniones con el doctor Jorge Albareda en las que se entendió el funcionamiento de las vías clínicas y la asignación de recursos para cada actividad. En este punto, se tomó la decisión que las elecciones se considerarían con una probabilidad del 50-50% y que las probabilidades y datos a tenerse en cuenta para el modelo son los que aparecen en la Tabla 1.

Probabilidad de que un paciente no pueda seguir vía clínica por infección	10%
Probabilidad vía clínica cadera	60%
Probabilidad vía clínica rodilla	40%
Probabilidad de pacientes que acaban el cuarto día	25%
Probabilidad de pacientes que acaban el quinto día	10%
Tiempo medio de operaciones	180 min

**Tabla 1: Datos aportados por el jefe del servicio de Cirugía ortopédica y Traumatología**

Una vez en este punto se necesitaban valores medios de las actividades, con lo cual se contactó con médicos, auxiliares y enfermeras para que nos dieran un valor medio del tiempo que le cuesta desarrollar cada actividad; los tiempos asignados a cada actividad se adjuntan en el anexo I.A.



**Figura 7: Modelo UML día operación**

La figura 7 refleja el modelo HSS del día de operación de ambas vías clínicas (cadera y rodilla). Como se puede ver el modelo muestra la toma de decisiones, la entrada y salida de recursos; además lleva incorporado etiquetas sobre la información sanitaria del paciente, en este día la información del paciente no aparece.

Una vez aceptados los modelos por parte del médico, los introducimos en la herramienta HEAT, cuyo funcionamiento se expone en el siguiente apartado.

### 3.2. Utilización de HEAT para obtener modelo

HEAT (Healthcare Efficiency and Effectiveness Analysis Tool) es una aplicación de software para apoyar el diseño y análisis de procesos desarrollados en las vías clínicas [12]. Está compuesta por dos diferentes herramientas: *HEAT-Scenario Designer* y *HEAT-Patients Monitor*. La primera de ellas puede ser usada para diseñar nuevos escenarios clínicos, revisar el correcto uso de los recursos y revisar las correctas estrategias de comunicación entre varias y diferentes vías clínicas; la utilidad de *HEAT-Patients Monitor* es controlar el flujo de pacientes que siguen una vía clínica modelada dentro del servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU, proporcionando a los médicos información útil sobre el comportamiento de las vías clínicas.

La metodología usada en HEAT se basa en HSS. Además, es posible transformar un modelo HSS en un modelo SWN. Como última ventaja sirve como base de datos que almacenará toda la información proporcionada en la utilización de las vías clínicas; esta información permitirá a la dirección del servicio tomar decisiones acerca de las cosas que se tienen que mejorar o si la vía clínica debe ser revisada.

Un escenario clínico se define como un conjunto de vías clínicas, recursos disponibles, pacientes e historias clínicas de cada paciente. El modelo SWN del sistema se obtiene aplicando las reglas de transformación modelo a modelo, especificadas en el anexo III.F. El modelo matemático permite estudiar la calidad y cantidad de las propiedades del sistema, tales como el tiempo de hospitalización que necesita un paciente (varía según el paciente y otros factores), la duración de los recursos en uso, entender dónde está el cuello de botella del sistema y como resolverlo. De la herramienta HEAT obtenemos tanto la red coloreada como la red sin colores; cabe destacar que la red coloreada es más pesada y que ello implica una mayor dificultad de obtener resultados sin un computador con grandes características, por ello en su mayoría los análisis se realizarán sobre las redes sin colores (GSPN).

A continuación describiremos brevemente la herramienta; HEAT ha sido diseñada para ser usada por el personal hospitalario y asume que el usuario final no debe estar familiarizado con el uso de las nuevas tecnologías o herramientas, con lo cual la interfaz de la que dispone es muy sencilla. La herramienta es un software de multi-plataformas desarrollado con Qt, utilizada para el desarrollo de interfaces de usuarios gráficas, y MySQL, que permite crear y manipular bases de datos.

El programa HEAT-Scenario Designer (Figura 8) sirve para crear o actualizar las vías clínicas y consta de tres menús:

- Escenario clínico: permite seleccionar uno de los escenarios clínicos disponibles, crear nuevos escenarios, modificar propiedades básicas de un escenario existente, eliminarlos y transformarlos a redes de Petri.
- Administrar: Una vez se selecciona el escenario clínico con el que se quiere trabajar el menú “*Administrar*” permite configurar el escenario en lo referente a Médicos (submenú que

permite configurar el equipo médico de trabajo), Recursos (este submenú permite añadir/modificar/eliminar los recursos disponibles en el sistema), Historias clínicas (permite al usuario editar la información referente a historia clínica de cada paciente) y Vías clínicas (da la opción de seleccionar la vía clínica usada para cada patología que se trata).

- Vía clínicas: Nos permitirá crear una nueva vía clínica, guardar/borrar/abrir la vía clínica con la que se está trabajando en la base de datos e importar/exportar dichas vías en/desde un archivo .xml.

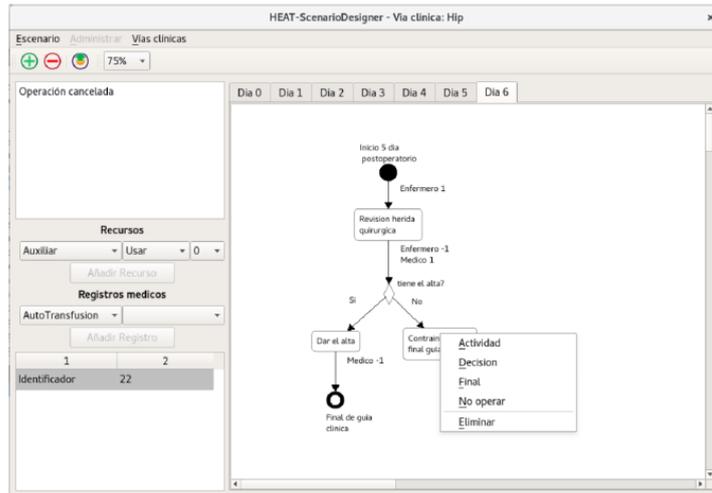


Figura 8: HEAT-Diseño del escenario clínico

El otro programa del que dispone la herramienta es HEAT-Patients Monitor (Figura 9) y tendrá una utilidad diaria para los médicos del servicio ya que los médicos podrán gestionar a los pacientes y su información, además de monitorizar las actividades que se llevan a cabo durante el tratamiento ya que una vez finalizada la actividad el médico, enfermero o auxiliar que haya realizado dicha actividad debe marcarla como realizada en la herramienta. Únicamente dispone del menú escenario clínico para seleccionar el escenario con el que se trabajará en cada momento.

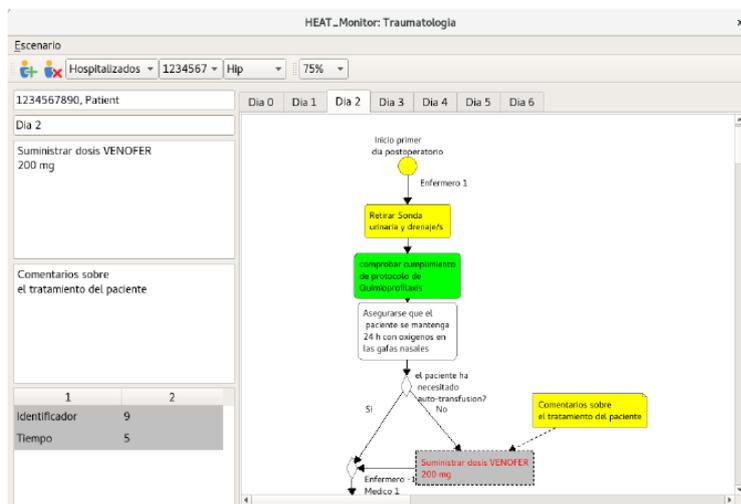


Figura 9: HEAT – Patients Monitor

El resultado de cada decisión y el tiempo requerido para cada actividad se utilizarán para actualizar las estadísticas y de esta forma los análisis mejorarán al tener datos reales. Este programa dispone en cada actividad de un área de texto para introducir comentarios de incidencias en la vía clínica, esto tiene una importancia relevante para encontrar las causas de fallo y puntos de mejora porque hay una especificación de los problemas que se han generado.

### 3.3. Transformación modelo a modelo (Reglas de transformación)

La especificación UML-HSS de la guía clínica, obtenida con HEAT, es un modelo semiformal de alto nivel que es fácil de entender por las personas que toman decisiones en el hospital. Sin embargo, este modelo no puede ser directamente analizado para evaluar las propiedades cualitativas y cuantitativas usando técnicas formales, tales como evaluar el tiempo que un paciente necesita estar hospitalizado para una intervención quirúrgica en un determinado escenario clínico. Por esta razón, se propone una técnica de transformación [1] modelo a modelo (M2M) para conseguir automáticamente un modelo SWN desde la especificación UML-HSS; las reglas de transformación se adjuntan en el anexo III.F.

### 3.4. Modelos utilizados

Encontrar un modelo adecuado para un análisis no ha sido sencillo, la herramienta HEAT nos proporciona tanto la red SWN como la GSPN en bucle cerrado con los recursos necesarios para su realización, a partir de ello modificamos los modelos matemáticos obtenidos a modelo final que nos interese.

#### 3.4.1. Modelo I

El primer modelo con el que se empezó a trabajar eran las vías clínicas completas en paralelo desarrolladas secuencialmente; se puede ver una representación simplificada en la Figura 10.

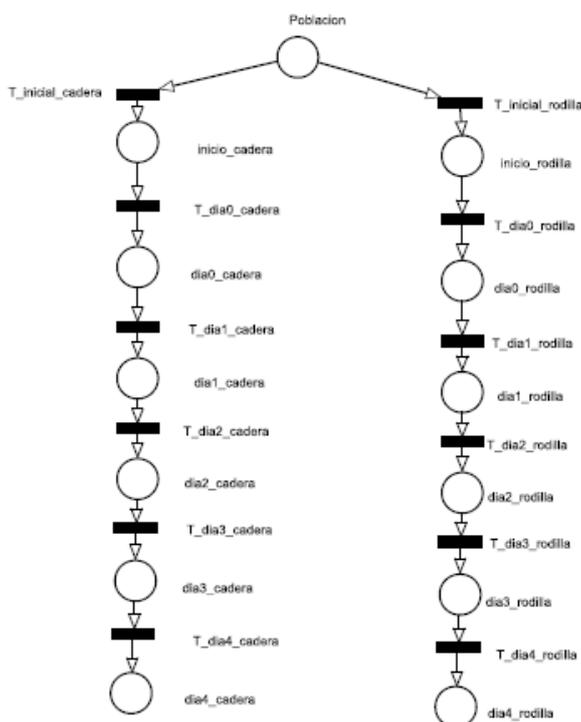


Figura 10: Representación del modelo secuencial

El primer enfoque que se le intentó dar a los modelos SWN obtenidos de HEAT fue ver el comportamiento secuencial de las redes de Petri. La Figura 10 es una simplificación, cada lugar es una subred SWN que engloba todas las actividades realizadas el día en concreto; no se representan los días cinco y seis, ni los recursos utilizados. Además, la primera intención fue trabajar en bucle cerrado; tras un tiempo trabajando con este modelo y sin obtener resultados sacamos varias conclusiones acerca de él:

Se puede observar el gran peso computacional que tiene el modelo ya que ninguno de los dos programas (GreatSPN y TimeNET) lograba simular y obtener algún resultado. Lo que se pretendía era obtener resultados acerca del tiempo necesario para tratar a un paciente satisfactoriamente, cuanto tiempo se necesitaría para atender a un determinado número de pacientes, etc.

Los inconvenientes que presenta dicho modelo son:

- Su tamaño, posee más de 255 transiciones con lo cual su análisis y simulación era inviable en la versión de GreatSPN de que se disponía.
- Los modelos con que se trabajan tienen que ser en bucle abierto, ya que un bucle cerrado no representaría la realidad, cada paciente que inicializa una vía clínica es independiente con lo cual no se puede utilizar un bucle cíclico en el cual una marca, que representa a un paciente, al acabar la guía clínica regrese al lugar inicial porque un paciente tratado correctamente no vuelve a ser tratado. En bucle cerrado al haber una ciclicidad los análisis pueden dar resultados falseados ya que una simulación o un análisis transitorio puede reflejar que varios pacientes pueden quedarse a mitad de tratamiento y lo que nos interesa es saber el número de pacientes que acaban satisfactoriamente.

### 3.4.2. Modelo II

El segundo modelo planteado lleva consigo varias restricciones: en este modelo se supone que cada equipo de trabajo, formado por tres médicos, un enfermero y un auxiliar trata al mismo paciente realizándose una atención más personalizada. Las primeras simulaciones, que se incluyen en el artículo "*HEAT: A Tool to Develop, Analyze and Monitor Clinical Guidelines*" [12], se realizan con este modelo sobre la vía clínica de cadera y en ella se plantean diversas situaciones en cuanto a la repartición de médicos.

Este modelo considera que se operan pacientes todos los días, pero aquí estriba un conflicto ya que el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU solo dispone de tres quirófanos que se utilizan para los distintos protocolos que desarrollan (lista de espera quirúrgica, urgencias, cirugía mayor ambulatoria, entre otras). La siguiente figura (Figura 11) es la representación del modelo utilizado para esta primera simulación.

El motivo de utilizar una transición temporizada (rectángulo vacío) en la parte superior para la repartición de marcas de cada día se debe a que en el programa GreatSPN para obtener resultados con SWN nos exigía que el inicio de dicha RdP venga definido por un Tangible marking que se representa con una transición temporizada al inicio de la RdP; al ser un modelo pesado con GreatSPN no se obtuvieron resultados ya que el portátil del que se disponía se quedó sin memoria RAM; se decidió acometer la simulación de la red de Petri decolorada en TimeNET y no se cambió dicha transición pero con una transición inmediata el modelo también funcionaría.

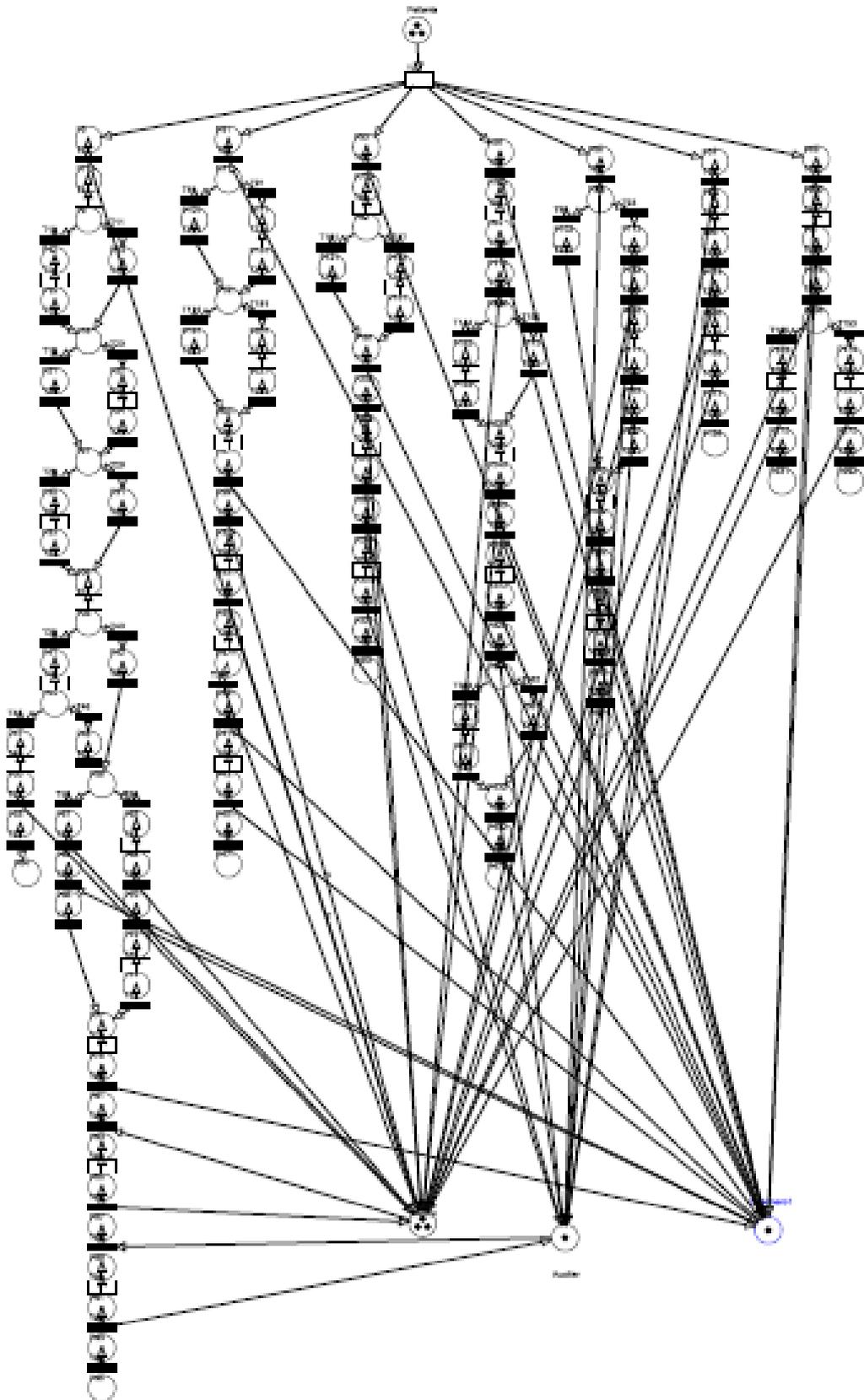


Figura 11: Modelo II. El modelo se puede encontrar en <https://webdiis.unizar.es/GISED/projects/M2H/index.html>

### 3.4.3. Modelo III

El tercer modelo sigue la misma estructura que el modelo II y se diferencia en el número de días que se opera; es un modelo a días que representa la forma de trabajo actual que se sigue en el Hospital Clínico. La gran diferencia con el segundo modelo es que cualquier médico de la plantilla puede realizar las actividades para cualquier paciente, no hay una personalización del seguimiento en el que cada médico trata a sus pacientes sino que cualquier medico puede tratar a un paciente indistintamente. Se trata de un modelo a días en el que se analizarán los días de la semana según las disponibilidades de quirófano ya que la operación es la actividad que marca el desarrollo del protocolo. La Figura 12 muestra este modelo, concretamente el día lunes.

Con el consejo del doctor Jorge Albareda, quien nos asesoraba en cuanto a la forma de trabajo que se lleva actualmente en el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología se decidió considerar que los médicos que operan están limitados a permanecer en el quirófano operando y un cuarto medico desarrolla la actividad de planta, situación que se simula con el modelo anterior y cuyos resultados se pueden ver en el Anexo II.

Los días que se operan son lunes, miércoles y viernes con lo cual la distribución de actividades es la siguiente (Tabla 1).

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Día 6	Día 0	<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 0
Día 4	Día 5	Día 6	Día 0	<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3

Tabla 1: Distribución de actividades diarias

En la representación del modelo III para el día lunes podemos ver que el día 1 es el mismo para las dos vías clínicas, con lo cual las marcas convergen en una misma secuencia de actividades. Los día seis y cuatro tienen diferentes secuencias de actividades para cada protocolo con lo cual están separados, pero estos dos días presentan una diferencia ya que hay pacientes que terminan satisfactoriamente la vía clínica entre los días cuatro y cinco (32, 5% de los pacientes tratados no empiezan el día 6); esta singularidad se ve reflejada en la parte izquierda de la imagen en la que se modela la separación de pacientes que ya han terminado la guía clínica y los que tienen que someterse a las actividades del último día.

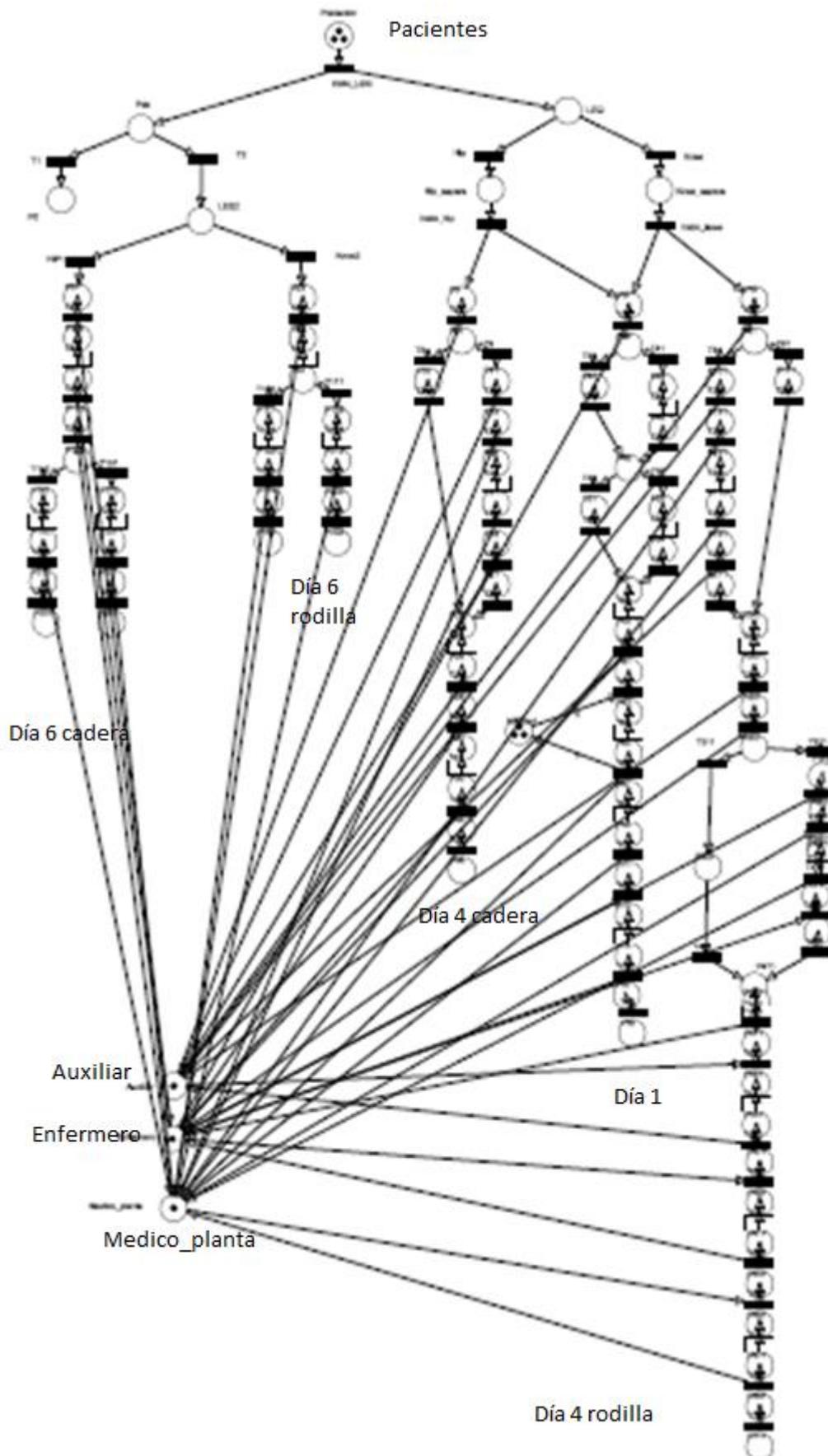


Figura 14: Modelo III-día Lunes. El modelo se puede encontrar en <https://webdiis.unizar.es/GISED/projects/M2H/index.html>



# Capítulo 4:

## Simulaciones

---

Existen dos métodos de analizar una red de Petri: método estático, que engloba análisis estructural, análisis por enumeración y análisis por transformación, y método dinámico, que consiste en un análisis mediante simulación. En este capítulo se presentan algunos de los resultados obtenidos; en el anexo II se adjunta todo el proceso desarrollado en cuanto a simulaciones y todos los resultados obtenidos.

### 4.1. Análisis estructural

El primer análisis a realizar fue el estructural, para ello se calcularon los T- y P- semiflujos de los modelos diarios (día 0,..., día 6) que conforman cada una de las vías clínicas.

El análisis estructural es independiente del marcado de las redes y se basa en la ecuación de estado de dichas RdP. Los modelos obtenidos en HEAT, son Stochastic Well- Formed Nets (SWN) de las cuales es difícil obtener su ecuación de estado y por consiguiente un análisis de este tipo es inviable, con lo cual eliminamos los colores de las SWN y obtenemos modelos Genereal Stochastic Petri Net (GSPN), que nos sirven para llevar a cabo el análisis estructural de los modelos.

El análisis desde las herramientas informáticas (TimeNET y GreatSPN) da resultados con los que se comprueba que los modelos GSPN iniciales son estructuralmente correctos, entonces, a partir de ellos se diseñaron los modelos finales que se sometieron a una simulación para ver el comportamiento dinámico del sistema.

Como se ha adelantado en el capítulo 2, para considerar una red de Petri estructuralmente válida es necesario que ella sea conservativa (todos los lugares deben estar incluidos en al menos uno de los P-semiflujos), con lo cual cumple la ley de conservación de marcas y consistente (todas las transiciones están incluidas en los distintos T-semiflujos, que coinciden con el número de diferentes posibles secuencias repetitivas en la red). Estos análisis se deben hacer en bucle cerrado; los resultados del análisis de la GSPN correspondiente al día 1 de ambas vías clínicas se puede ver en el anexo II.A.

### 4.2. Análisis por enumeración

Como se ha mencionado en el capítulo 3, los modelos SWN con los que trabajamos tienen un elevado número de transiciones, lugares y marcas (pacientes, médicos, etc.) lo cual dificulta el

análisis de las redes SWN mediante el grafo de alcanzabilidad (grafo que representa todos los marcados alcanzables en una RdP). En la mayoría de modelos SWN es el único método que se puede utilizar para su análisis.

En nuestro caso, debido a las características del sistema que intentamos representar (los pacientes superan satisfactoriamente una vía clínica y el proceso se da por terminado) nos lleva a trabajar en bucle abierto, lo que implica un determinado número de marcados muertos, ya que al llegar al final de la secuencia la red queda muerta.

Se calculó el grafo de alcanzabilidad de los distintos días que componen una vía clínica, en concreto la vía clínica artroplastia de cadera, aumentando progresivamente el número de pacientes; los resultados se reflejan en las Tablas 2 y 3 (en dichas tablas t refleja el tiempo en minutos que costo obtener los resultados).

# Pacientes	Día 0		Día 1		Día 2		Día 3	
	# Marcados	t(min)						
1	87	1	34	1	16	1	20	1
2	21013	8	517	2	183	1	544	2
3	92917	60	9696	5	1611	3	6962	5
4	>40000	>180	33849	12	14415	6	76910	23

Tabla 2: Número de marcados alcanzables los distintos días que conforman la vía clínica Artroplastia de cadera I

# Pacientes	Día 4		Día 5		Día 6	
	# Marcados	t(min)	# Marcados	t(min)	# Marcados	t(min)
1	18	1	11	1	21	1
2	215	1	93	1	297	2
3	1909	3	577	2	2947	4
4	15545	3	3119	2	25433	5

Tabla 3: Número de marcados alcanzables los distintos días que conforman la vía clínica Artroplastia de cadera II

El número de marcados que se aprecia en las tablas es el número total de marcados alcanzables; el programa GreatSPN nos desglosa dichos marcados en “Vanishing Marking” (marcado alcanzable al dispararse una transición inmediata) y “Tangible Marking” (marcado alcanzable al dispararse una transición temporizada).

Como conclusión, se puede decir que el tiempo computacional (t (min) en las Tablas 2 y 3) y el número de marcados van aumentando exponencialmente según incrementa el número de pacientes, con lo cual este método de análisis no se puede utilizar en caso de disponer de un número elevado de pacientes.

#### 4.3. Análisis dinámico

Las simulaciones se han hecho sobre modelos construidos a partir de los modelos diarios obtenidos mediante HEAT. Se han realizado varias simulaciones, de las cuales se han obtenido una

gran cantidad de valores numéricos que se adjuntan en el anexo II.C. Dicho anexo recoge todo el proceso de simulación dinámica llevado a cabo a lo largo de este TFG.

Las primeras simulaciones realizadas sobre el modelo II (Figura 11) nos dan las siguientes conclusiones:

- El número máximo de pacientes a operar un día en un quirófano es tres. Se adjunta en la Tabla 4 los datos correspondientes a la simulación del modelo II con la hipótesis de disponer tres médicos, un enfermero, un auxiliar y un número de pacientes igual a 21 (3 por cada uno de los 7 días que conforman la vía clínica) ya que a cada secuencia de actividades correspondiente al día<sub>i</sub> de la vía clínica le corresponde tratar a tres pacientes.

<b>Análisis 3 pacientes</b>		
	<b>Nº medio</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>día 0</b>	2,870	0,957
<b>día 1</b>	2,180	0,727
<b>día 2</b>	2,967	0,989
<b>día 3</b>	2,954	0,985
<b>día 4</b>	2,984	0,995
<b>día 5</b>	2,980	0,993
<b>día 6</b>	2,345	0,782

Tabla 4: Datos obtenidos en la simulación del modelo II.

Se hace referencia que en todas las tablas aportadas “Nº medio” indica el número medio de pacientes tratados tras 480 minutos y “Probabilidad” que indica la probabilidad de que se trate un número de pacientes igual a 3 tras 480 min; dicha probabilidad se calcula como el Nº medio dividido para el número de pacientes a tratar (3) en cada secuencia de actividades (día<sub>i</sub>).

- El cuello de botella es el día de la operación, asumiendo que el número de quirófanos es constante, y no está limitado por los recursos ni por el número de pacientes a tratar; la limitación es intrínseca a la red, concretamente al tiempo que dura la operación.

Como se puede ver en las siguientes simulaciones (Tabla 5) se aprecia una mejora de resultados conforme se aumenta, sobretudo, el número de médicos ya que es el recurso más influyente en nuestros modelos. El recurso enfermero/auxiliar tiene poca influencia en la vía clínica y tiene una fuerte dependencia con el médico, es decir cuanto mayor sea la eficiencia del conjunto de médicos dichos recursos tendrán más trabajo e incluso puede llegar a ser necesario aumentarlos para no añadirle una limitación más al modelo. La Tabla 5 muestra el número medio de pacientes tratados el día 1 (día operación) al variar el número de médicos, asumiendo a la entrada tres pacientes.

<b>3 pacientes</b>		
	<b>Nº medio</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>3_medicos</b>	2,180	0,727
<b>4_medicos</b>	2,390	0,797
<b>5_medicos</b>	2,506	0,835
<b>6_medicos</b>	2,501	0,834
<b>3med/quirof_med/planta</b>	2,361	0,787

**Tabla 5: Influencia de la variación del número de médicos en la probabilidad**

Se observa que el número medio de pacientes tratados en ocho horas con éxito aumenta conforme se dispone de un mayor número de médicos (sistema monótono) y el mayor salto se da al disponer de cinco médicos, se considera que no hay cambio de cinco a seis pacientes; la mayor eficiencia se obtiene para un número elevado de médicos pero no tiene sentido implementarla ya que con tres médicos (Tabla 4) se consigue una probabilidad de éxito elevada para las actividades correspondiente a cada día. Entonces, con tres médicos se conseguiría tratar con una probabilidad elevada un aproximado de 19 pacientes (suma del número medio de pacientes en la Tabla 5).

- Se considera que la mejor hipótesis de trabajo es aquella en la que se limitan tres médicos a la operación (la cirugía requiere que tres médicos estén en quirófano al mismo tiempo), y se dispone de un médico en planta para cumplimentar con el resto de actividades. Atendiendo a los consejos del doctor Jorge Albareda y basándonos en los valores obtenidos (Tabla 5) se decide seguir esta hipótesis para un segundo análisis.

Se puede ver que esta hipótesis hace más eficiente el proceso si se compara con la probabilidad obtenida para el día 1 utilizando tres médicos (78,7% frente a 72,7%), y que tiene resultados similares a la opción de disponer de 4 médicos que vayan cumplimentando todas las actividades según sean requeridos sin que estén reservados al quirófano. La hipótesis a emplear nos permite asegurar la disponibilidad de recursos en la operación y cumplimentar las actividades en planta durante ocho horas.

Una vez demostrado que el cuello de botella es la actividad operación se realiza un análisis previo de los modelos diarios obtenidos desde HEAT sin considerar el uso de los recursos para de esta forma conocer el número medio de pacientes que podemos tratar. Hay que tener en cuenta que existe la posibilidad de que pacientes puedan terminar el proceso de forma satisfactoria el día 4 y el día 5, sin necesidad de permanecer ingresados hasta el día 6.

La simulación del modelo III (Figura 12) lleva consigo variaciones respecto al modelo II que se han especificado en el capítulo 3. Se hace una simulación de los siete días de la semana; cada día se desarrollan distintas actividades correspondientes a los distintos días de las vías clínicas. Las actividades diarias dependerán de los días que se realicen las operaciones; la distribución diaria aparece reflejada en la Tabla 6. Si nos fijamos en los modelos, el modelo III presenta un menor número de nodos ya que se desarrollan menos actividades (sólo se operan tres días por semana con lo cual se deben cumplimentar menos actividades) pero hay que tener en cuenta que en este modelo se trabaja con las dos vías clínicas en paralelo.

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Día 6	Día 0	<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 0
Día 4	Día 5	Día 6	Día 0	<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3

Tabla 6: Distribución de las actividades a realizar los diferentes días de la semana siendo Día 1 el día de la intervención quirúrgica.

Las simulaciones lanzadas son similares variando las actividades diarias (según la distribución mostrada en la Tabla 6), con lo cual este apartado reflejará los resultados obtenidos para el día lunes (los resultados tienen el mismo formato para cada día); el resto de días se pueden encontrar en el anexo II.C. Los recursos que se utilizan son un médico en planta, un auxiliar, un enfermero y tres médicos operando y dichos recursos son suficientes para cumplimentar satisfactoriamente las actividades.

Lunes	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Probabilidad	Nº medio	Probabilidad
<b>Día 1</b>	2,586	0,862	2,642	0,881
<b>Día 4</b>	3,000	1,000	3,000	1,000
<b>Día 6</b>	1,623	0,541	1,640	0,547

Tabla 7: Probabilidades obtenidas en la simulación del día lunes –modelo III- asumiendo 9 pacientes a la entrada (3 que se operan el lunes, 3 operadas el viernes de la semana anterior y 3 que se operaron el miércoles pasado).

La Tabla 7 refleja el número medio de pacientes tratados con éxito utilizando como recursos cuatro médicos (tres designados a quirófano y uno en planta), un enfermero y un auxiliar; se puede observar que comparando los valores obtenidos con el número medio de pacientes obtenidos en la simulación sin considerar recursos hay una disminución razonable ya que la compartición de recursos implica una pérdida de eficiencia que no se considera significativa en la mayoría de casos.

Para terminar se ha realizado una estimación del número medio de pacientes que se tratan a diario y aparecen reflejados en la Tabla 8.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
<b>Nº pacientes medio</b>	7,209	8,055	7,201	8,849	7,752	7,587	8,075

Tabla 8: Número medio de pacientes tratados cada día de la semana

Con los resultados reflejados se puede decir que el servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU “Lozano Bielsa” presenta un buen rendimiento de trabajo en cuanto a pacientes de Lista Espera Quirúrgica se refiere; en la hipótesis analizada los recursos utilizados son suficientes para conseguir realizar las tareas de cada día; si bien es cierto el objetivo principal de una vía clínica no es conseguir el mayor rendimiento sería interesante buscar maximizar la utilización de recursos, con lo cual se requeriría la utilización de un mayor número de quirófanos.

Se hace mención de que todas las simulaciones se han realizado con un portátil Intel core i7 de 3 GB de memoria RAM y con un intervalo de confianza del 95 %.



# Capítulo 5:

## Conclusiones

---

Este trabajo aporta los pasos a seguir para una modelización de una vía clínica, partiendo de un formato texto, y obtención de modelos formales que permitan un análisis de la forma de trabajo actual del Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del Hospital Clínico “Lozano Blesa”.

Las distintas aportaciones que se han realizado en este trabajo son: (a) modelado con UML de vías clínicas, (b) colaboración en el desarrollo de la herramienta HEAT, (c) participación en el artículo “HEAT: A Tool to Develop, Analyze and Monitor Clinical Guidelines”, (d) obtención de modelos que representen la forma de trabajo en el hospital clínico mediante los modelos diarios obtenidos a partir de los modelos UML, (e) simulación de modelos finales y análisis de dichos resultados.

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.

En cuanto al tiempo empleado, se ha trabajado aproximadamente durante seis meses y el principal problema encontrado ha sido el análisis de modelos tan grandes. En cuanto a la experiencia conseguida con este trabajo destaco el trabajo conjunto con mis tutores, Cristian Mahulea, Jorge Albareda y Luis Parrilla, a quienes les agradezco el tiempo que han dedicado a ayudarme en la realización del presente trabajo.

Desde el punto de vista profesional el presente trabajo me ha ayudado a darme cuenta de que la obtención de resultados no es tan sencilla y que llegar a resultados válidos puede llevar mucho tiempo; además que todo el trabajo realizado tiene un aprovechamiento. Cada actividad realizada en el marco de este TFG me ha servido para aprender cosas en el plano sanitario y en el plano ingenieril.

El presente trabajo tiene una corriente de ampliación ya que actualmente se ha instalado la herramienta informática en el Hospital Clínico “Lozano Blesa”, con lo cual se puede abordar un segundo análisis con datos reales que puede aportar mayor información sobre dicho sistema.



# Referencias

---

- [1] S. Bernardi, J. Albareda y C. Mahulea *“Toward a decision support system for the clinical guidelines assesment”* , 2016, technical report, Universidad de Zaragoza.
- [2] Dres García Caballero J, Díez Sebastián J, Chamorro Ramos L, Navas Acien A, Franco Vidal A. *“Vías Clínicas”* Unidad de Garantía de Calidad. Hospital Universitario La Paz, Paseo de la Castellana 261 28046 Madrid.
- [3] M. Field y K. Lohr *“Guidelines for Clinical Practice:from Developmment to use”*. Washington, DC: National Academy, 1992.
- [4] Aricca Van Citters, Eugene Nelson, Don Goldmann, Frank Federico, Anthony DiGioia, Beth O’Donnell, Julia Rowe Taylor *“Integrated Care Pathway for Total Joint Arthroplasty”*.
- [5] Laurent Debrauwer, Firn Van Der Heyde , *“UML 2 Iniciación, ejemplos y ejercicios corregidos”*
- [6] [http://www.teatroabadia.com/es/uploads/documentos/iagramas\\_del\\_uml.pdf](http://www.teatroabadia.com/es/uploads/documentos/iagramas_del_uml.pdf)
- [7] Simona Bernardi, Lacramioara Dranca *“Sistemas de información para la dirección: Un enfoque guiado por un caso de estudio”*.
- [8] Manuel Silva *“Las redes de Petri: en la Automática y la informática”*.
- [9] K. Jensen y L.M, Kristensen, *“Coloured Petri Nets:Modelling and Validation of cConcurrent Systems”*, 1<sup>st</sup> ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2009.
- [10] M. Silva, L Recalde *“Redes de Petri continuas: expresividad, análisis y control de una clase de sistemas lineales conmutados”*.
- [11] Javier Campos *“Evaluación de prestaciones de sistemas concurrentes modelados en redes de Petri”*
- [12] Luis Parrilla, Jose García, Jorge Albareda, Cristian Mahulea *“HEAT: A tool to develop, Analyze and Monitor Clinical Guidelines”*.
- [13] Manual GreatSPN, <http://www.di.unito.it/~susi/DIDATTICA/SPC04-05/manual.pdf>
- [14] Alvaro García Sanchez, Miguel Ortega *“Introducción a la simulación de Sistemas discrretos”*.
- [15] Daniel Clavel *“Desarrollo de un algoritmo basado en la preasignación de buffers que permita la vivacidad de sistemas de red DSSP inicialmente no vivos”*.



# Anexo I:

## Catálogos

### Anexo I.A Catálogo vías clínicas

Se juntan las vías clínicas en modo texto, las cuales han servido como punto de partida para obtener los modelos UML.

	<p style="text-align: center;"><b>PLAN DE MEJORA DE LA CALIDAD</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología</b></p>	<p style="text-align: center;">“HOSPITAL CLINICO UNIVERSITARIO “LOZANO BLESA”</p> <p style="text-align: center;">Avda. San Juan Bosco, 15  50009-ZARAGOZA</p>
--	---	---

### PROCOLO- GUIA DE PRACTICA CLINICA

### ARTROPLASTIA DE RODILLA

Elaborado	Elaborado	Aprobado
Fecha: Octubre 2013	Fecha: Octubre 2013	Fecha: Diciembre 2013
Jefe de Servicio	Responsable de Calidad	Comisión de Dirección del Servicio
Jorge Albareda Albareda	Jose M. Lasierra Sanromán	

### **DIAS PREVIOS AL INGRESO**

- Verificar documentación completa procedente de la consulta
- Verificar que ha sido valorado por Anestesia y posibles incidencias
- Verificar si tiene firmado el Consentimiento Informado

### **DIA DEL INGRESO**

- 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 horas)
- 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

### **DIA DE LA INTERVENCIÓN**

- Comprobar que el paciente baje a quirófano con la Hª 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

### **1º DIA POSTOPERATORIO**

- 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

### **2º DIA POSTOPERATORIO**

- Retirar drenajes
- Retirada de vía venosa

- Realizar revisión-cura de la herida
- Iniciar tratamiento fisioterápico con Artromotor
- Autorizar deambulación con bastones ingleses

### **3º DIA POSTOPERATORIO**

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

### **4º DIA POSTOPERATORIO**

- Además de lo correspondiente al día 3º
- Ver Rx de control
- Valorar si cumple criterios para alta en 24 horas

### **5º DIA POSTOPERATORIO**

- 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.

	<p><b>PLAN DE MEJORA DE LA CALIDAD</b></p> <p><b>Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología</b></p>	<p>“HOSPITAL CLINICO UNIVERSITARIO “LOZANO BLESA”  Avda. San Juan Bosco, 15  50009-ZARAGOZA</p>
---	---	---

## PROCOLO-GUIA DE PRACTICA CLINICA

### ARTROPLASTIA PRIMARIA DE CADERA

Elaborado	Elaborado	Aprobado
Fecha: Octubre 2013	Fecha: Octubre 2013	Fecha: Diciembre 2013
Jefe de Servicio	Responsable de Calidad	Comisión de Dirección del Servicio
Jorge Albareda Albareda	Jose M. Lasierra Sanromán	

#### DIAS PREVIOS AL INGRESO

- Verificar documentación completa procedente de la consulta
- Verificar que ha sido valorado por Anestesia y posibles incidencias
- Verificar si tiene firmado el Consentimiento Informado

#### DIA DEL INGRESO

- 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 horas)
- 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

### **DIA DE LA INTERVENCIÓN**

- Comprobar que el paciente baje a quirófano con la Hª 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

### **1º DIA POSTOPERATORIO**

- 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

### **2º DIA POSTOPERATORIO**

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

### **3º DIA POSTOPERATORIO**

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

### **4º DIA POSTOPERATORIO**

Gestión hospitalaria utilizando el modelado, análisis y optimización de las vías y guías clínicas

- Además de lo correspondiente al día 3º
- Ver Rx de control
- Valorar si cumple criterios para alta en 24 horas

#### **5º DIA POSTOPERATORIO**

- 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.

La Tabla 9 refleja los tiempos medios adoptados para cada actividad

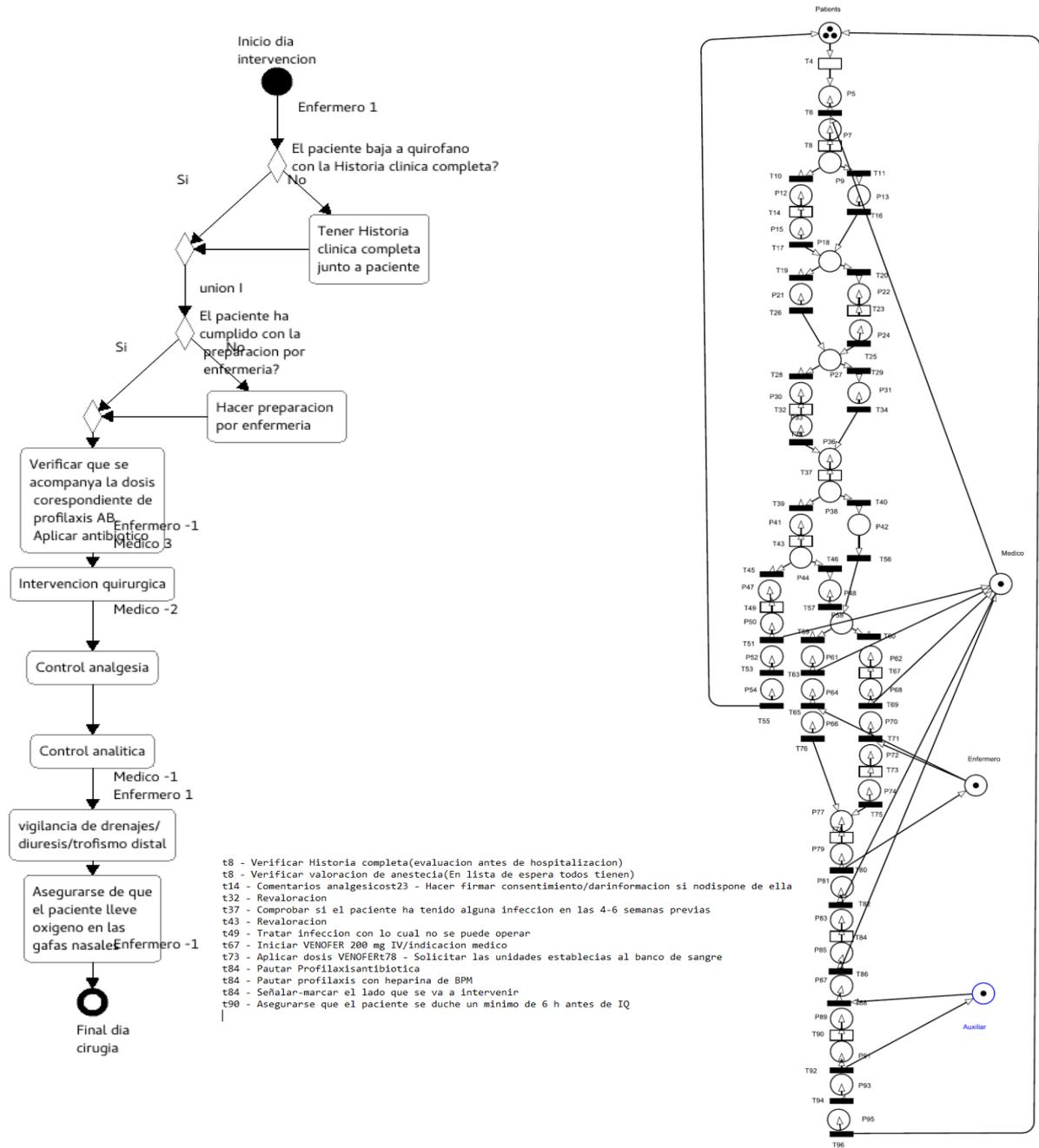
Verificar Hº Completa y valoración de anestesia	20 min
Realización de comentarios analgésicos	2 min
Firma consentimiento/informar de firma consentimiento	1 min
Revaloración de problemas durante estancia en LEQ	2 min
Tratar infección que impide operación(diagnostico)	10 min
Iniciar VENIFER 200 mg IV	5 min
Solicitud unidades establecidas al banco de sangre	1 min
Pautar profilaxis antibiótica y profilaxis con Heparina de BPM	2 min
Señalar/marcar zona a intervenir	5 min
Ducha del paciente antes de intervención	15 min
Comprobación de la Hº clínica del paciente antes de que baje a quirófano	5 min
Comprobar preparación por enfermería	1 min
Verificar dosis de Profilaxis AB	1 min
Control analgesia/analítica/drenajes/diuresis/trofismo distal	6 min
Asegurarse que el paciente lleva gafas nasales	0,5 min
Verificar drenajes y controles analíticos	5 min
Comprobar cumplimiento de protocolo de Quimioprofilaxis	3 min
Asegurarse que el paciente se mantenga 24 h con oxígeno en fosas nasales	1 min
Suministrar dosis VENOFR 200 mg	5 min
Solicitar control Rx	1 min
Levantar de la cama	10 min
Retirar drenajes	5 min
Retirada vía venosa	1 min
Revisión-cura de la herida	15 min
Iniciar tratamiento fisioterápico con Artromotor	30 min
Deambulación con bastones ingleses	10 min
Comprobar disponibilidad de suplemento para WC	1 min
Artromotor progresivo	30 min
Comprobar/Reclamar Rx de control	10 min
Valorar si precisa colaboración a RBH	15 min
Ver Rx de control	10 min
Valorar si cumple criterios alta	10 min
Tramites alta hospital	15 min
Citas correspondientes para próximas revisiones	5 min

**Tabla 9: Tiempo medio empleado para realizar las distintas actividades**

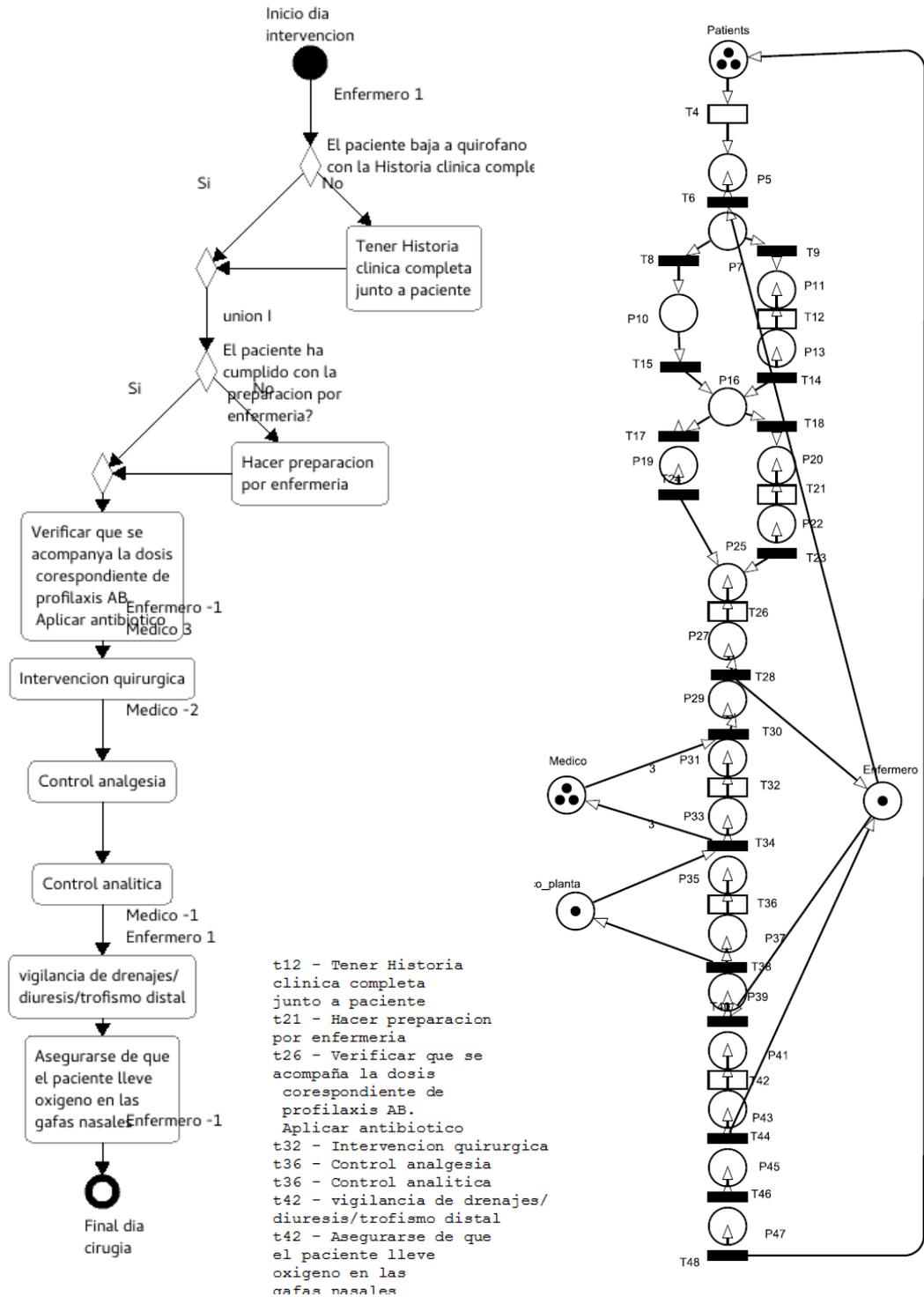
Anexo I.B Catálogo de modelos HSS & Redes de Petri

En este anexo se adjuntan los modelos HSS para cada día y su correspondiente transformación a RdP P/T. El día 0, día 1 y día 2 tiene la misma secuencia de actividades para las dos vías clínicas. Se aporta el modelo HSS de la vía clínica artroplastia de rodilla

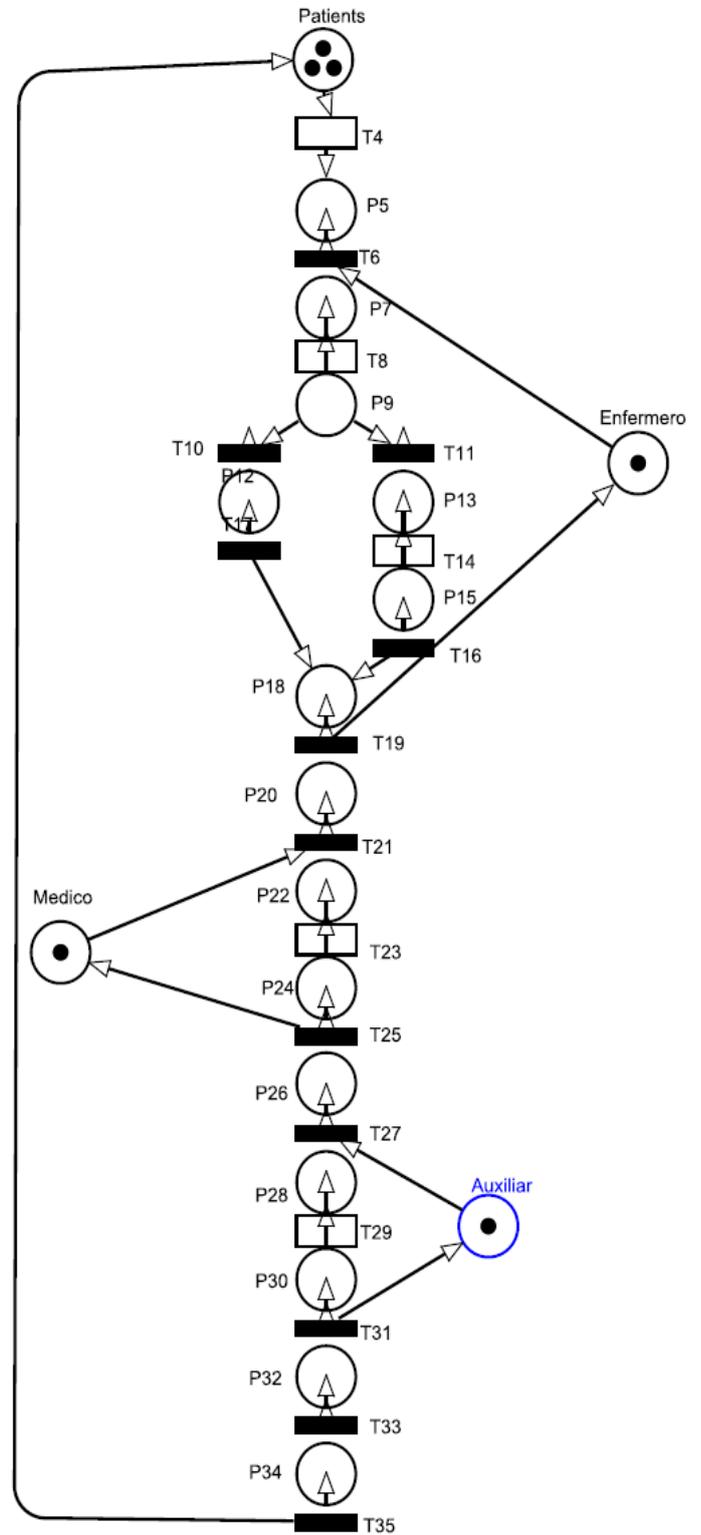
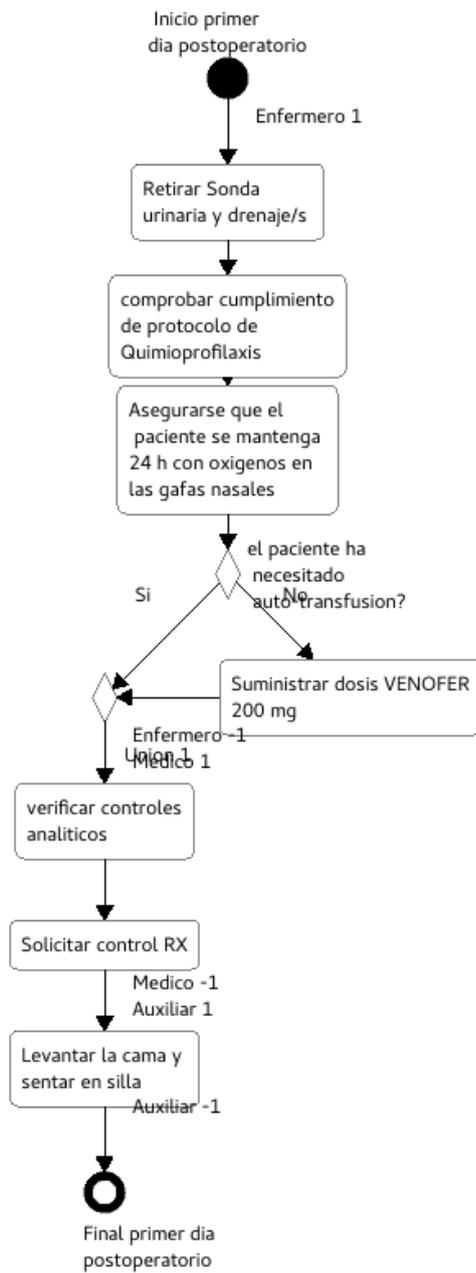
- Día 0



- Día 1

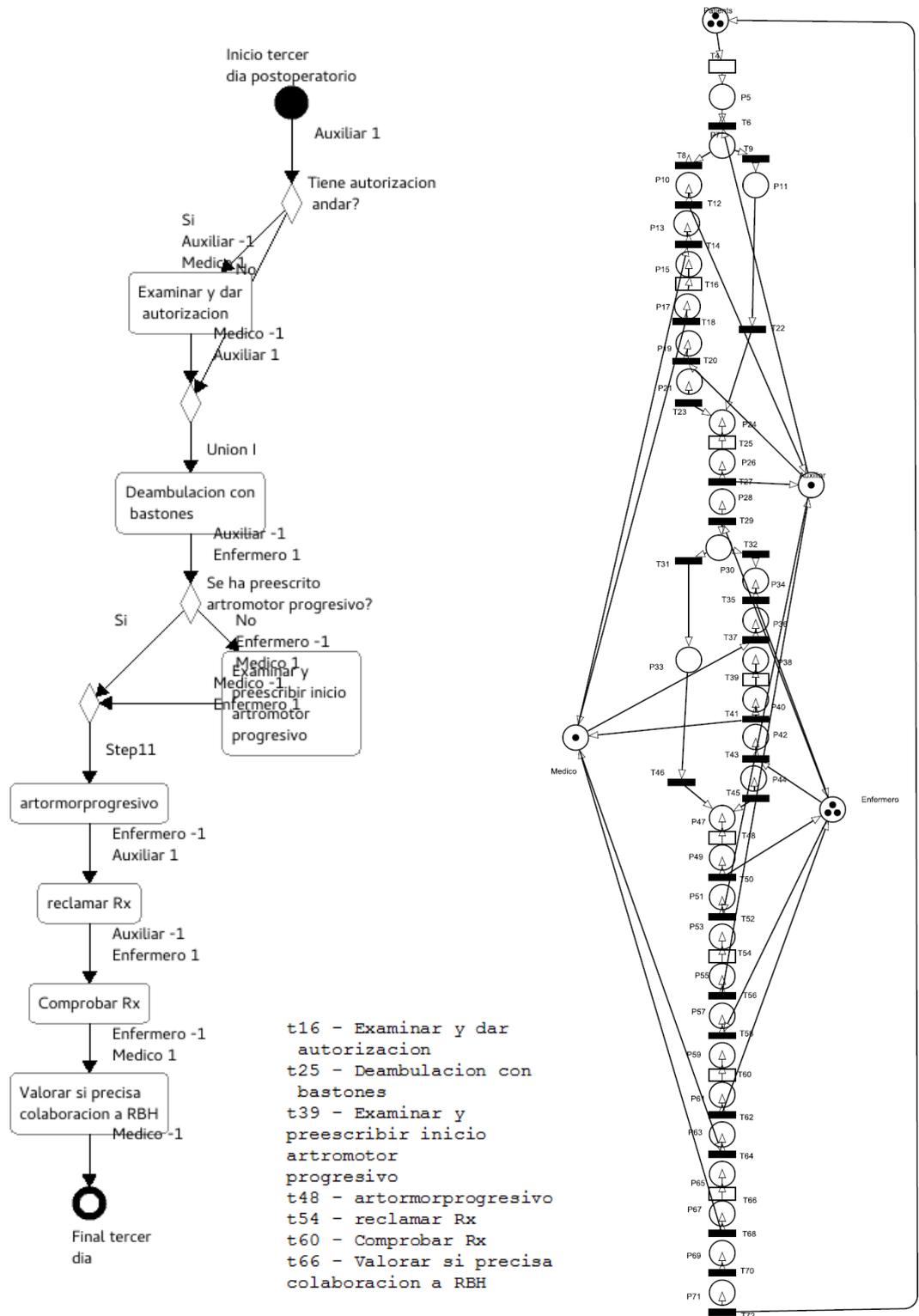


- Día 2

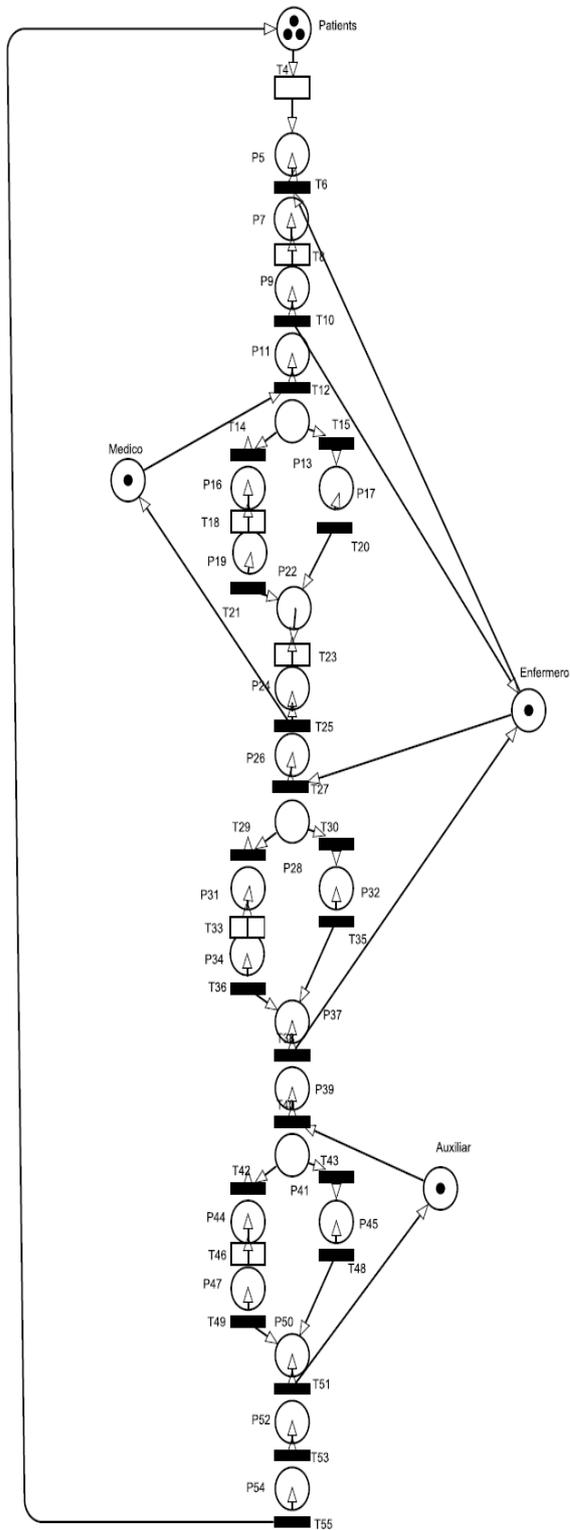
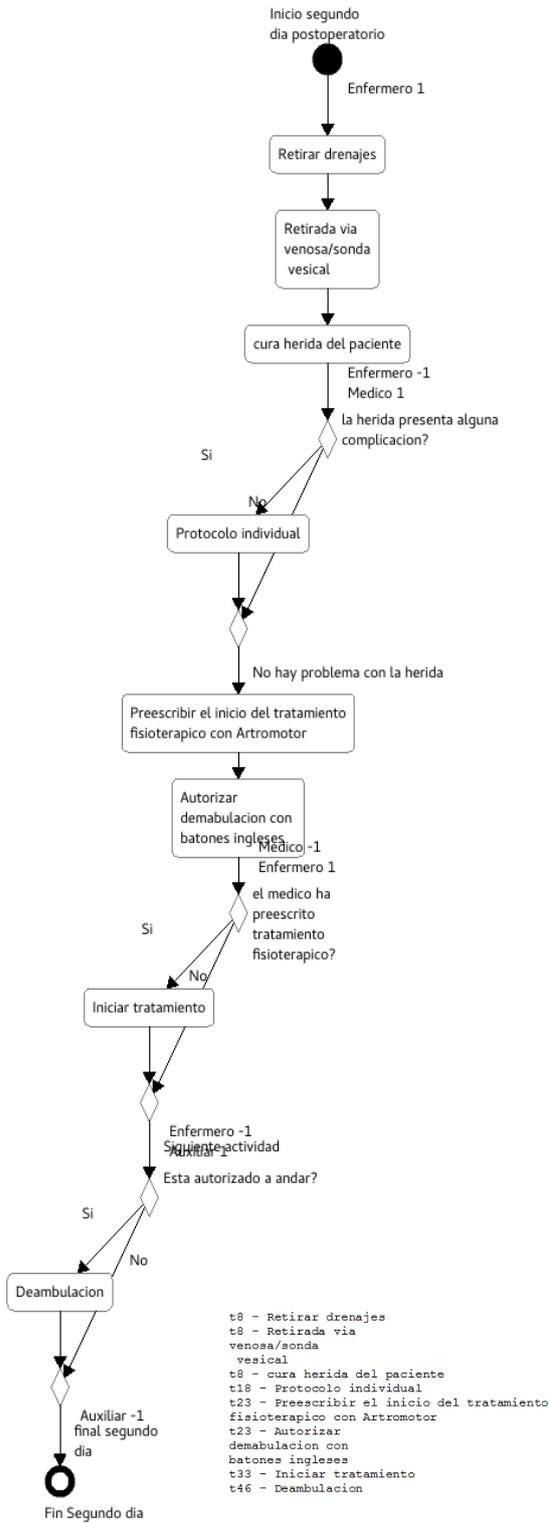


- t8 - Verificar drenajes
- t8 - comprobar cumplimiento de protocolo de Quimioprofilaxis
- t8 - Asegurarse que el paciente se mantenga 24 h con oxigenos en las gafas nasales
- t14 - Suministrar dosis VENOFER 200 mg
- t23 - verificar controles analiticos
- t23 - Solicitar control RX
- t29 - Levantar la cama

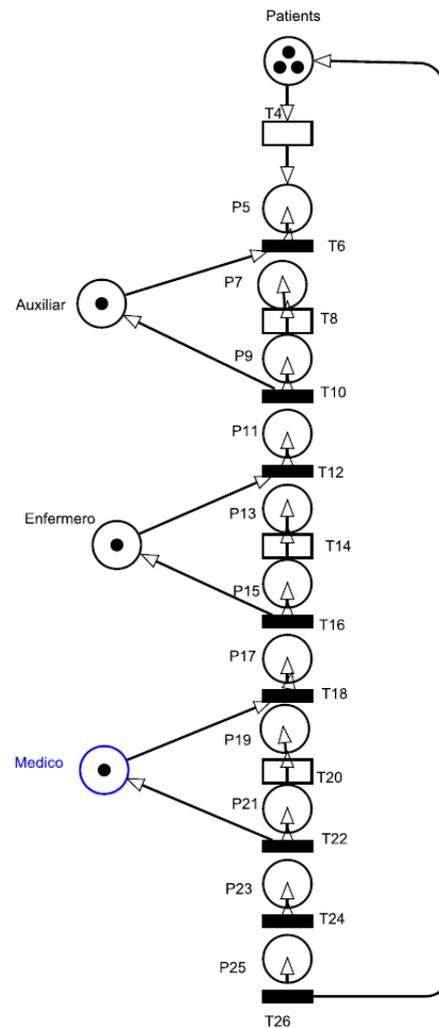
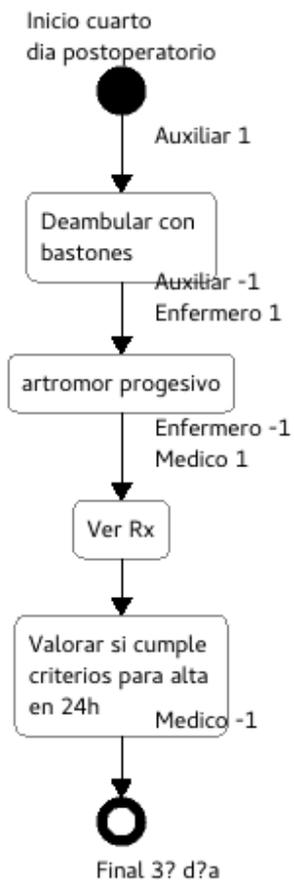
- Día 3



• Día 4

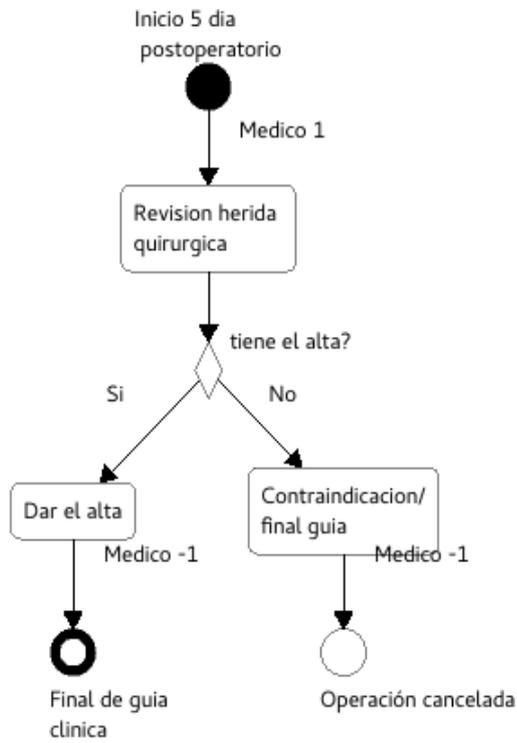


- Día 5

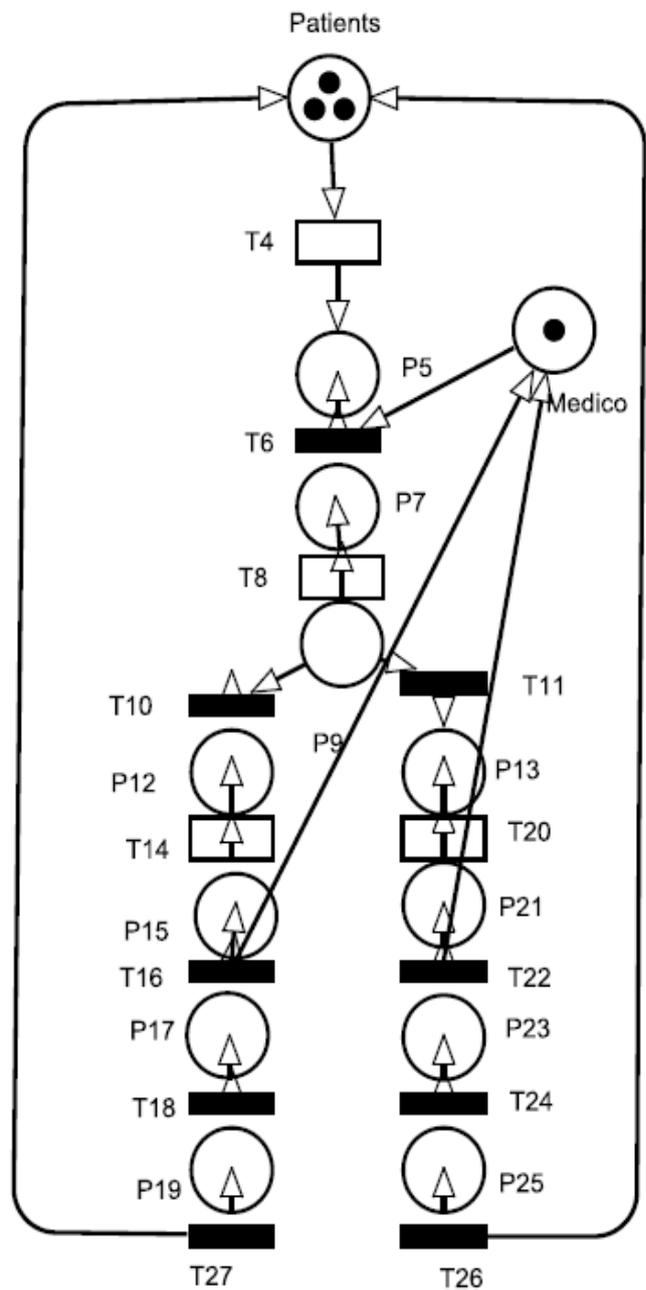


t8 - Deambular con bastones  
 t14 - artromor progresivo  
 t20 - Ver Rx  
 t20 - Valorar si cumple criterios para alta en 24h

- Día 6



t8 - Revisión herida quirúrgica  
 t14 - Dar el alta  
 t20 - Contraindicación/final guía



# Anexo II:

# Análisis basado en modelos formales

---

Existen diferentes métodos de análisis de la validez de las RdP:

- Análisis por enumeración
- Análisis por transformación
- Análisis estructural
- Análisis por simulación

Los tres primeros análisis se engloban en los llamados métodos estáticos y el análisis por simulación se considera como un método dinámico. Cabe destacar que las simulaciones se realizarán con un portátil Intel CORE i7, 3 GB de memoria RAM y se utilizará un intervalo de confianza del 95%.

## Anexo II.A Análisis estructural

En cuanto al análisis estructural de los modelos, con el fin de comprobar que los modelos con los que trabajamos sean conservativos y consistentes, obtenemos los P- y T-semiflujos. Los P-semiflujos satisfacen la ley de conservación de marcas y los T- semiflujos corresponden a los comportamientos repetitivos.

Una red es conservativa si todos los lugares pertenecen a al menos un P -semiflujo y consistente si todas las transiciones pertenecen a un T- semiflujo. Se ha comprobado que los modelos cumplen estas condiciones y adjuntamos el análisis realizado para el día 1-día operación- (Figura 15) de ambas vías clínicas.

Los resultados obtenidos en TimeNET y en GreatSPN son:

The net contains 4 P-invariants.

```
#Patients + #P5 + #P7 + #P10 + #P11 + #P13 + #P16 + #P19 + #P20 + #P22 + #P25 + #P27 +  
#P29 + #P31 + #P33 + #P35 + #P37 + #P39 + #P41 + #P43 + #P45 + #P47 = 3
```

```
#Enfermero + #P7 + #P10 + #P11 + #P13 + #P16 + #P19 + #P20 + #P22 + #P25 + #P27 + #P41  
+ #P43 = 1
```

```
#P35 + #P37 + #Medico_planta = 1
```

```
#Medico + #3*P31 + #3*P33 = 3
```

All places are covered by p-invariants.

The net contains 4 T-invariants.

(T4, T26, T32, T36, T42, T6, T8, T15, T17, T24, T28, T30, T34, T38, T40, T44, T46, T48)

(T4, T21, T26, T32, T36, T42, T6, T8, T15, T18, T23, T28, T30, T34, T38, T40, T44, T46, T48)

(T4, T12, T26, T32, T36, T42, T6, T9, T14, T17, T24, T28, T30, T34, T38, T40, T44, T46, T48)

(T4, T12, T21, T26, T32, T36, T42, T6, T9, T14, T18, T23, T28, T30, T34, T38, T40, T44, T46, T48)

All transitions are covered by t-invariants.

El número de P-semiflujos coincide con el número de recursos compartidos menos uno ya que tenemos un P-semiflujo correspondiente a los pacientes. En cuanto a los T-semiflujos hay dos conflictos con lo cual el primero da dos opciones y cada secuencia de disparo de la primera decisión presenta dos caminos en la siguiente decisión con lo cual la red de Petri de la Figura 13 presenta cuatro vectores que reflejan distintas secuencias repetitivas.

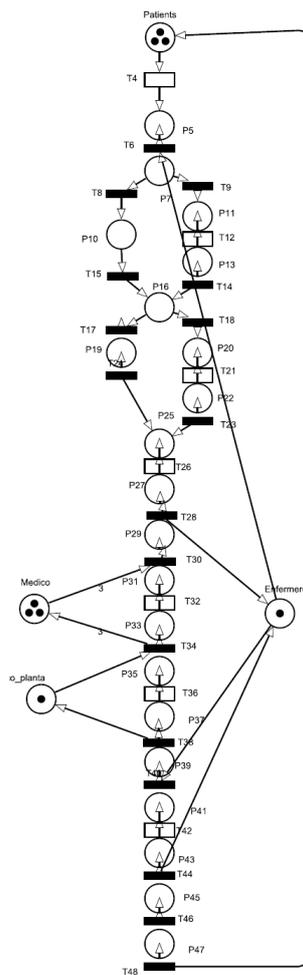


Figura 13: modelo SPN día 1

**Anexo II.B Análisis por enumeración**

El análisis por enumeración se basa en la simulación exhaustiva de las evoluciones posibles del marcado de la RdP mediante el grafo de alcanzabilidad. El grafo de alcanzabilidad [6] es un grafo en el que cada nodo representa un marcado alcanzable a partir de un marcado inicial y cada arco el disparo de una transición. Se representa un arco etiquetado con el nombre de la transición disparada  $t_k$ , que va del nodo  $M_i$  al nodo  $M_j$ , si al disparar la transición  $t_k$  a partir del marcado  $M_i$  se obtiene el marcado  $M_j$ .

La construcción del grafo de alcanzabilidad culmina cuando se ha considerado todas las evoluciones posibles del sistema a partir de los marcados alcanzables; para abordar la construcción de dicho grafo es necesaria que la red sea limitada, en el caso de que sea ilimitada recurrimos a un grafo de cobertura.

Se realizó un análisis a partir del cual se pretendía demostrar que es imposible poder analizar las propiedades de los modelos globales con los que se trabaja mediante los grafos de alcanzabilidad debido al tamaño de nuestros modelos. Para ello se calcularon los ordinary markings (marcados ordinarios) y los symbolic markings(marcados simbólicos) de cada día para distinto número de pacientes, el número de pacientes se inicializó en uno y se fue aumentando hasta cuatro que es el número máximo de pacientes que se pueden operar en ocho horas ( consideramos que el tiempo medio de operación es 120 minutos y una jornada de trabajo abarca 480 minutos).

Para ver el coste computacional necesario (t (min) en Tablas 10 y 11) en la consecución del grafo de alcanzabilidad se empezó a simular (Tablas 10 y 11) los distintos días que componen la vía clínica “Protocolo-Guía clínica artroplastia primaria de cadera” y los resultados fueron el crecimiento exponencial del tiempo necesario para obtener resultados. El día que más tiempo ha empleado en el cálculo del grafo de alcanzabilidad fue el día 0 al ser la red más grande; asimismo con cuatro pacientes los seis días necesitan un elevado coste computacional.

# Pacientes	Día 0		Día 1		Día 2		Día 3	
	# Marcados	t(min)						
1	87	1	34	1	16	1	20	1
2	21013	8	517	2	183	1	544	2
3	92917	60	9696	5	1611	3	6962	5
4	>40000	>180	33849	12	14415	6	76910	23

Tabla 10:# marcados alcanzables los distintos días que conforman la vía clínica Artroplastia de cadera I

Pacientes	Día 4		Día 5		Día 6	
	# Marcados	t(min)	# Marcados	t(min)	# Marcados	t(min)
1	18	1	11	1	21	1
2	215	1	93	1	297	2
3	1909	3	577	2	2947	4
4	15545	3	3119	2	25433	5

Tabla 11: # marcados alcanzables los distintos días que conforman la vía clínica Artroplastia de cadera II

En las Tablas 10 y 11 se unifica el número de marcados ordinarios (VM + TM). La simulación se ha hecho sobre la red SWN considerando tres médicos, un auxiliar y un enfermero como recursos. A continuación mostramos el grafo de alcanzabilidad del día 6, para un paciente (Figura 14).

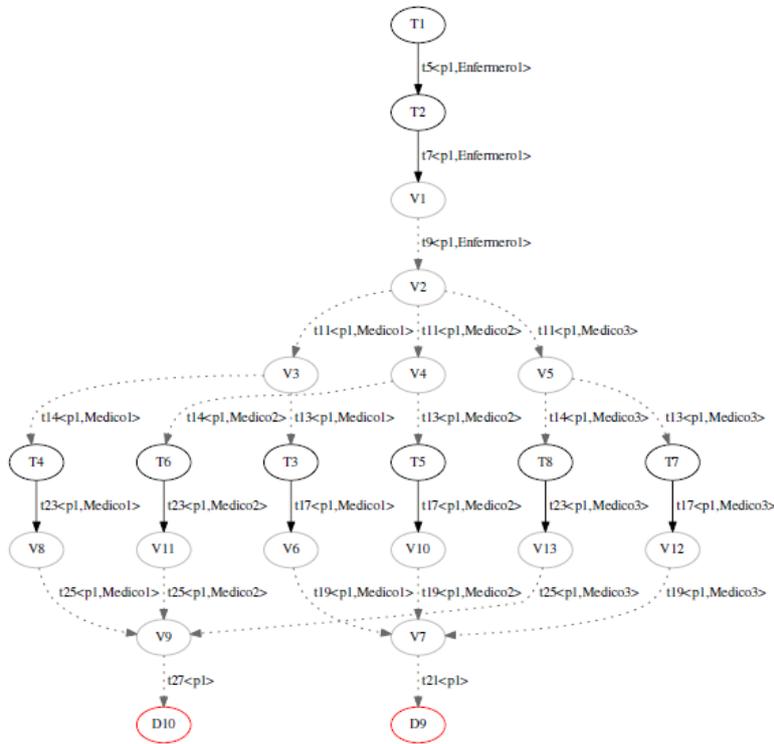


Figura 14: Grafo de alcanzabilidad para 1 paciente en el modelo día 6

Con los datos aportados se puede ver, sobre todo el aumento del tiempo necesario para obtener resultados en el día 0 (el de mayor peso computacional) llegando a hacer más de dos horas; hace falta mencionar que la cantidad de memoria requerida para hacer dichos análisis también iba aumentando.

## Anexo II.C Método dinámico. Simulación

### Simulación Modelo I

La simulación del modelo I es inviable debido al peso computacional que presenta.

### Simulación Modelo II

La siguiente prueba realizada trató de ver la evolución de un protocolo durante un día. Para ello fue necesario el uso del modelo GSPN debido al tamaño del modelo y se realizó el análisis mediante simulación transitoria con un tiempo de 480 minutos que reflejaba las ocho horas laborales del día; en la imagen del modelo (Figura 15) se está haciendo la suposición de que se tratan tres pacientes por cada día que conforma la vía clínica (cada día de trabajo se deberían tratar

21 pacientes), con lo cual todos los días que componen la vía clínica se desarrollan a diario. En concreto, el análisis se hace sobre el protocolo de cadera.

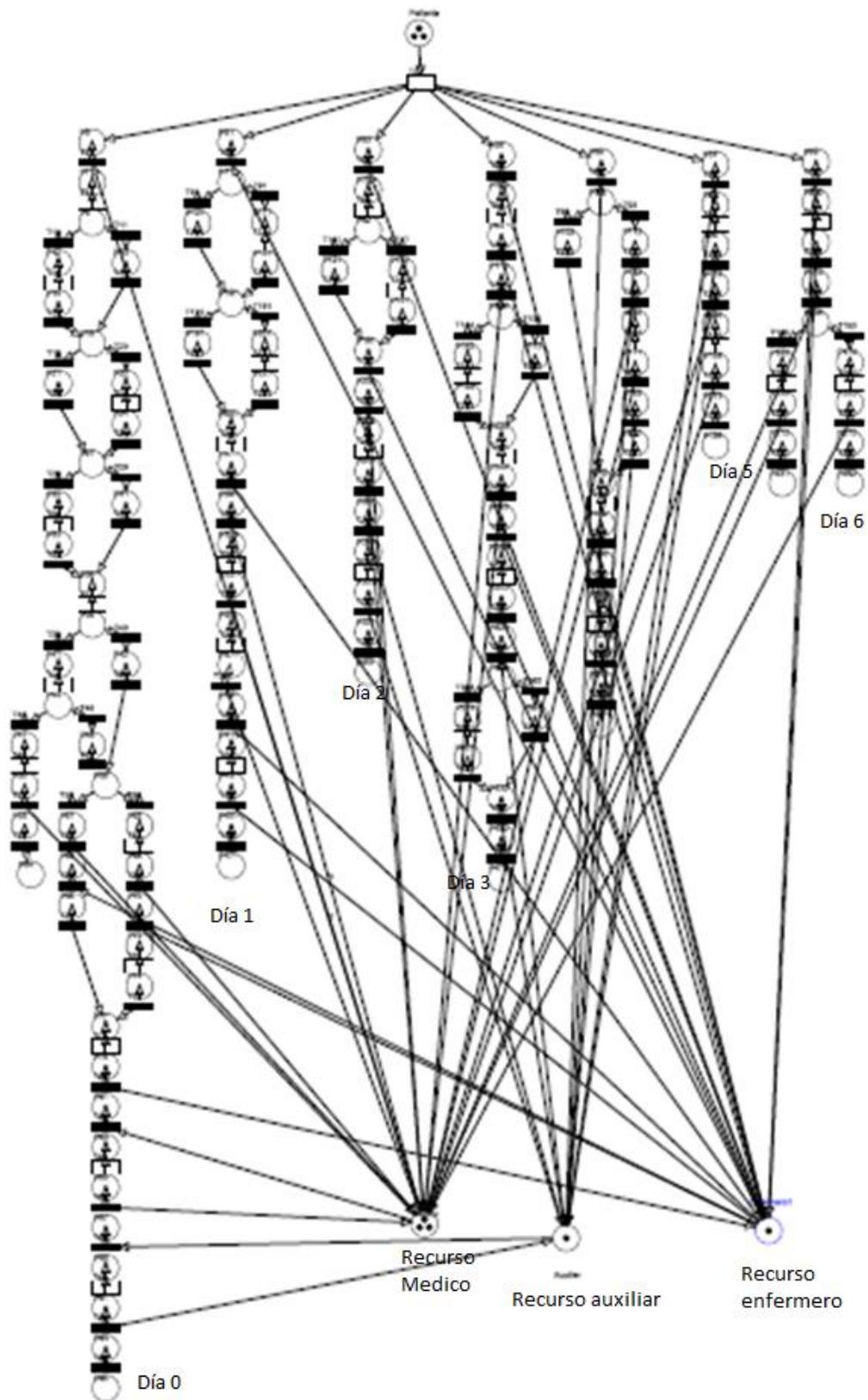


Figura 15: modelo II SWN

Como se puede observar, se plantea un modelo no secuencial ya que cada equipo de trabajo, formado por tres médicos, un enfermero y un auxiliar, atiende a 21 pacientes correspondientes a los siete días (3 por cada día) de los que consta el protocolo (Figura 15).

El día que actúa como cuello de botella limitando el proceso es el día 1; si atendemos al tiempo medio de operación que es 120 min y consideramos que el turno de mañana consta de ocho horas (480 minutos) se establece el número máximo de pacientes que se pueden tratar son cuatro. Si nos fijamos sólo en el tiempo necesario para llevar a cabo todas las actividades del día 1 con disponibilidad de recursos, el tiempo obtenido sería de aproximadamente de 135 min, pero ese es valor medio que costaría al equipo sanitario tratar a un paciente el día de su operación; como se menciona es un valor medio, ya que trabajamos con transiciones temporizadas que siguen un comportamiento exponencial. Por esta razón el tiempo que se tarde en operar satisfactoriamente a un paciente podrá ser mayor o menor.

Horas diarias	480	min/día	Recursos	médicos	3
T operación	120	min		enfermeros	1
Nº pacientes	4			auxiliar	1

Tabla 12: Datos 1º simulación del modelo II

<b>Análisis 4 pacientes</b>		
	<b>Nº medio</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>día 0</b>	3,777	0,944
<b>día 1</b>	2,232	0,558
<b>día 2</b>	3,912	0,978
<b>día 3</b>	3,938	0,985
<b>día 4</b>	3,987	0,99675
<b>día 5</b>	3,969	0,992
<b>día 6</b>	2,230	0,557

Tabla 13: Resultados de 1º simulación del modelo II, con 4 pacientes. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 4 pacientes satisfactoriamente en 480 min.

La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos tras la simulación transitoria realizada con TimeNET en las que se calcula el número medio de pacientes tratados con éxito para cada día con un total de cuatro pacientes en el lugar inicial.

El programa TimeNet nos proporciona gráficas que representan la evolución de la probabilidades buscadas con el tiempo; se considera que adjuntar todas las gráficas no aporta valor a este trabajo con lo cual se explicaran los resultados gráficos del día 1 que es el más conflictivo de la vía clínica.

Con un análisis en bucle abierto sólo se pueden analizar las probabilidades debido a la aparición de marcados muertos. En el caso de trabajar con bucles cerrados se podrían obtener otros indicadores.

- DÍA 1

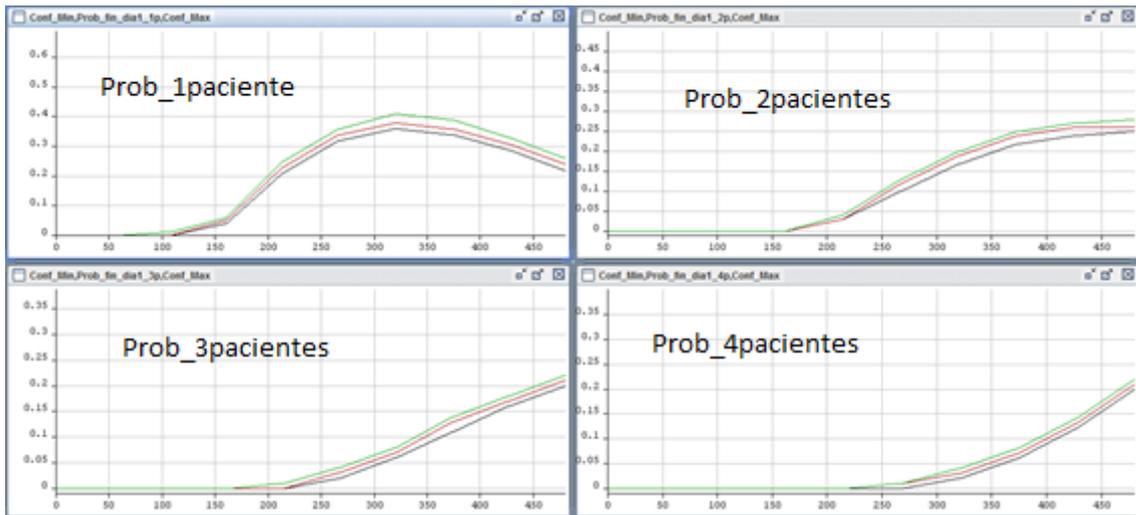


Figura 16: Funciones que representan la evolución de la probabilidad al tratar 1, 2, 3 y 4 pacientes satisfactoriamente

La probabilidad que los cuatro pacientes consigan acabar satisfactoriamente sigue una perfecta distribución exponencial (grafica inferior derecha-Figura 16), mientras que la función que muestra la evolución de que un único paciente se trate en 180 min (gráfica superior izquierda-Figura 16) presenta una forma un tanto parabólica. La gráfica que representa la evolución de que dos y sólo dos pacientes se traten en 480 min (grafica superior derecha-Figura 16) muestra el paso de una distribución parabólica a una función aproximadamente lineal (gráfica inferior izquierda-Figura 16) correspondiente a que sólo tres pacientes se traten en un turno. Según nuestro análisis este día es el que limita el proceso y prácticamente un equipo tratará una media de dos pacientes por día según los valores de probabilidad obtenidos tras 480 minutos.

Estas probabilidades se han usado para calcular el número medio de pacientes tratados en 480 minutos.

$$\begin{aligned} \text{N}^{\circ} \text{ medio} &= \text{Prob}(1 \text{ sólo paciente tratado}) * 1 + \text{Prob}(\text{sólo 2 pacientes tratados}) * 2 \\ &+ \text{Prob}(\text{sólo 3 pacientes tratados}) * 3 + \text{Prob}(\text{sólo 4 pacientes tratados}) * 4 \end{aligned}$$

En las gráficas se puede observar claramente que hasta los doscientos minutos la probabilidad de tener un único paciente tratado es bastante baja, esto se debe a la limitación del tiempo que dura la operación y que en nuestro modelo se representa con una transición temporizada que presenta un retraso aleatorio que sigue una distribución de probabilidad exponencial con media de 120 min.

En el caso del día uno que es el que limita el protocolo el valor medio de marcas es muy cercano a dos; cabe destacar que al ser una simulación con transiciones temporizadas de carácter exponencial se pueden tratar dos o tres pacientes según el día; pero al ser el valor medio 2,232 (Tabla 12) la conclusión que se saca es que un equipo de doctores, es decir tres médicos, trata dos pacientes por día normalmente. Esto es un problema ya que al limitar el número de pacientes se contribuye a la ociosidad de los recursos, con lo cual, no se aprovechan.

El número medio de pacientes que se consigue tratar satisfactoriamente (Tabla 13) es de un valor cercano a dos pacientes, por lo que se plantean dos opciones:

- Limitar el sistema a la atención de un menor número de pacientes por día
- Aumentar el número de médicos

### Disminución de número de marcas

La simulación anterior se repite para tres pacientes y obtenemos la Tabla 14.

Análisis 3 pacientes		
	Nº medio	Probabilidad
día 0	2,870	0,957
día 1	2,180	0,727
día 2	2,967	0,989
día 3	2,954	0,985
día 4	2,984	0,995
día 5	2,980	0,993
día 6	2,345	0,782

Tabla 14: Resultados de simulación del modelo II con 3 pacientes. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min.

Se puede observar que la modificación influye, ya que la probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente mejora (obtenemos una probabilidad de 0,727, que es mayor a los 0,558 obtenidos al hacer la simulación para cuatro pacientes-Tabla 15-) pero el número medio de paciente tratados sigue siendo cercano a 2. De aquí nos damos cuenta que una reducción del número de pacientes no es una solución adecuada e intentamos variar el número de recursos para ver como evoluciona el modelo. En esta simulación se han obtenido los valores medios usando una función propia de TimeNET que nos proporciona el valor medio esperado en un lugar junto a las siguientes gráficas.

### Variación del número de recursos

Se lanzan distintas simulaciones (Tabla 15 y 16) modificando el número de recursos. El número de pacientes diarios a operar es tres y cada tabla refleja el número medio de pacientes tratados satisfactoriamente el día 1 en 480 minutos.

3 pacientes a tratar en el día 1				
	x=3 médicos		x=4 médicos	
	Nº medio	Probabilidad	Nº medio	Probabilidad
X médicos	2,180	0,727	2,390	0,797
xmed_enf_2aux	2,225	0,742	2,413	0,804
xmed_2enf_aux	2,240	0,747	2,409	0,803
xmed_2enf_2aux	2,247	0,749	2,422	0,807

Tabla 15: Variación de recursos considerando 3 pacientes I. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min.

3 pacientes a tratar en el día 1				
	x=5 médicos		x=6 médicos	
	Nº medio	Probabilidad	Nº medio	Probabilidad
X médicos	2,506	0,835	2,501	0,834
xmed_enf_2aux	2,487	0,829	2,537	0,846
xmed_2enf_aux	2,529	0,843	2,578	0,859
xmed_2enf_2aux	2,503	0,834	2,554	0,851

Tabla 16: Variación de recursos considerando 3 pacientes II. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min.

Las Tablas 17 y 18 reflejan el comportamiento del modelo de la Figura 15 ante la variación de los recursos; se puede ver que las probabilidades van cambiando (sistema monótono, las probabilidades van mejorando con un mayor número de recursos). Se observa que el recurso que más influye son los médicos (se puede ver que el número medio de pacientes tratados aumenta con el número de médicos pasando de 2,180 con tres médicos a 2,554 con seis médicos), los enfermeros y auxiliares introducen variaciones más pequeñas, que se pueden despreciar ya que el número medio de pacientes al ir variando auxiliares y enfermeros oscila poco. Si bien es cierto el máximo valor de número de pacientes se alcanza con seis médicos, la mayoría del tiempo dichos recursos (en concreto 3 médicos) estarían inutilizados ya que como se puede ver en la Tabla 14 el número de pacientes tratados todos los días es cercano a tres exceptuando el día 1, con lo cual no se considera una buena solución ya que tres médicos serían suficientes para conseguir que el sistema sea eficiente.

Hacemos mención de la situación de reservar tres médicos para la operación y un médico en planta que cumplimente el resto de actividades (Tabla 17).

3 pacientes a tratar en el día 1		
	Nº medio	Probabilidad
3med/quirof_med/planta	2,361	0,787

Tabla 17: Valores obtenidos para la hipótesis de 3 médicos reservados para operación. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min.

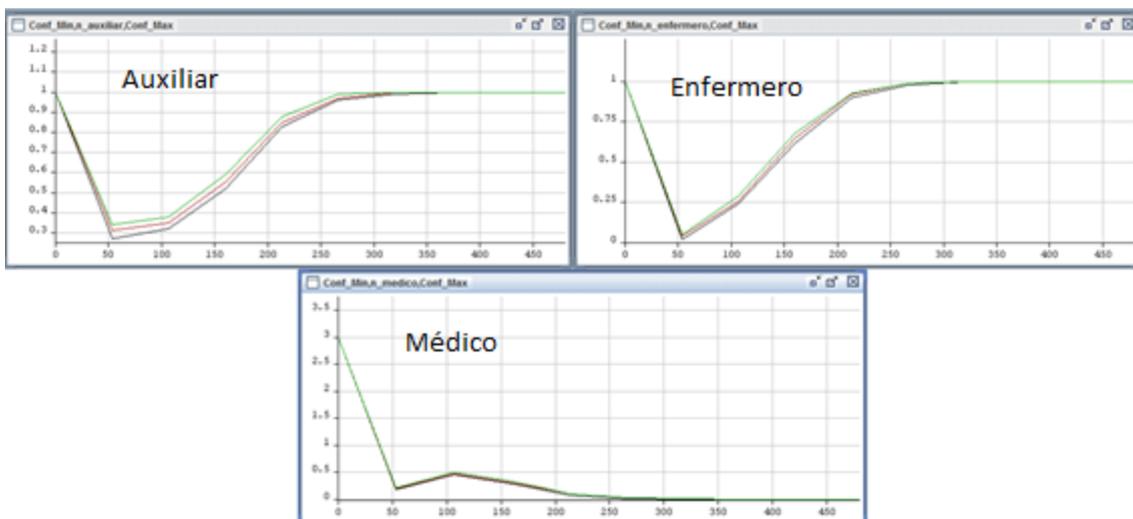


Figura 17 Evolución de los recursos considerando tres médicos, 1 enfermero y 1 auxiliar

Se ha analizado la evolución del número medio de marcas en los lugares correspondientes a los distintos recursos (Figura 17). Se observa que los recursos enfermero y auxiliar cumplen sus actividades en torno a los 250 minutos y que después de ese minuto su actividad disminuye considerablemente. (Gráficas superiores- Figura 17- ) y los médicos tiene una constante ocupación y tienen trabajo después de acabar el turno.

Una vez hecha esta primera simulación, que se utilizó en la redacción del artículo "HEAT: A Tool to Develop, Analyze and Monitor Clinical Guidelines" , implementamos los resultados y las indicaciones del doctor y codirector de este trabajo Jorge Albareda para realizar las siguientes simulaciones.

### Simulación modelo III

De las simulaciones anteriores se ha deducido, que el cuello de botella de cualquier vía clínica es el día de la operación y que limita el número de pacientes, da igual el número de médicos que se utilicen en un solo quirófano el número máximo de pacientes que se puede operar ( día 1) es 3.

Una vez en este punto y apoyándonos en las conclusiones de la simulación anterior se hará una simulación de las actividades, que conforman las dos vías clínicas, sin considerar el uso de los recursos para tener una referencia del número medio de pacientes que podemos tratar.

La Tabla 18 muestra el número medio de pacientes tratados sin utilización de recursos por día.

	Artroplastia de rodilla			Artroplastia de Cadera		
	Nº medio	Probabilidad	Tiempo	Nº medio	Probabilidad	Tiempo
<b>Día 0</b>	2,87	0,96	480,00	2,87	0,96	480,00
<b>Día 1</b>	2,64	0,88	480,00	2,64	0,88	480,00
<b>Día 2</b>	3,00	1,00	100,00	3,00	1,00	100,00
<b>Día 3</b>	3,00	1,00	210,00	3,00	1,00	200,00
<b>Día 4</b>	3,00	1,00	300,00	3,00	1,00	150,00
<b>Día 5</b>	3,00	1,00	250,00	2,27	0,76	150,00
<b>Día 6</b>	2,4	0,8	175,00	2,37	0,79	150,00

Tabla 18: Probabilidades máximas de la vía artroplastia de rodilla y cadera. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min. Tiempo: minutos en los que se alcanza tratar al número medio de pacientes.

En la Tabla 18 el tiempo refleja la cantidad de minutos para alcanzar dicho número medio. Se observa que el día 0, día 1 y día 2 alcanzan el mismo número de pacientes para ambas guías clínicas y que en el día seis se ve que el 80 % de pacientes que se someten a actividades de dicho día finalizan satisfactoriamente y que el 20 % restante no finaliza la guía y hay un fallo.

En el día cero existe la posibilidad de que un paciente no continúe con la vía clínica por problemas de infección urinaria; la probabilidad de pacientes que abandonan la vía clínica el primer día es: Probabilidad (1paciente abandone VC)= 0.14633; al ser tan baja no se ha visto necesario calcular para más pacientes porque se considera despreciable. La probabilidad de que un paciente falle el día 1 de la vía clínica de rodilla es 0,14633, ya que la secuencia de tareas a realizar es la misma.

Hay que tener en cuenta que el día cinco y seis de cada vía clínica presentan una particularidad, ya que hay pacientes que acaban satisfactoriamente el proceso los días cuatro y cinco; los datos aportados por el médico son que el 25% de los pacientes, que trata el servicio de

Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU acaban el día cuatro y que el 10 % de los pacientes que inician el día 5 reciben el alta ese día, con lo cual hemos calculado que el 32,5% de pacientes recibe el alta entre los días cuatro y cinco. En las tablas anteriores (Tabla 18) se ha hecho una simulación de la RdP de cada día sin utilización de recursos sin considerar estas singularidades.

Se ha introducido el desarrollo en paralelo de ambas guías clínicas, punto que varía respecto a la primera simulación, con lo cual se procede a simular y obtener las probabilidades de pacientes que se tratan a diario por cada vía clínica (Tabla 19).

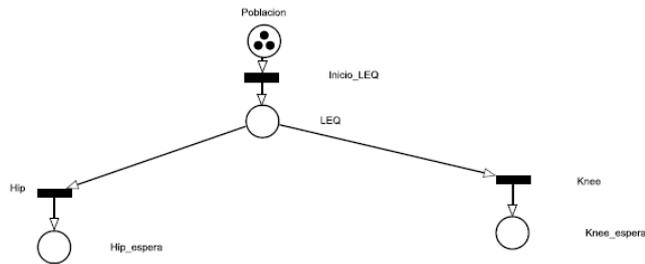


Figura 18: Acoplamiento de las dos vías clínicas

	Nº medio	Probabilidad
<b>Cadera</b>	1,8132	0,6044
<b>Rodilla</b>	1,19181	0,39727

Tabla 19: Nº medio de pacientes tratados en cada vía clínica. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min.

Una vez hecha la simulación (Tabla 19) del acoplamiento se utiliza el modelo de la Figura 19 para tener en cuenta dicho acoplamiento de las dos vías clínicas y obtener el número medio de pacientes que se tratan los días cinco y seis (Tabla 20).

Los resultados son:

	Día 5		Día 6	
	Nº medio	Probabilidad	Nº medio	Probabilidad
<b>Cadera</b>	1,330	0,443	1,018	0,339
<b>Rodilla</b>	0,889	0,296	0,622	0,207
<b>Conjunta</b>	2,219	0,740	1,640	0,547

Tabla 20: Resultados de probabilidades considerando reducción pacientes sobre totalidad pacientes tratados. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min.

Se cumple que el día 5 se tratan el 75 % de los pacientes y el día 6 el 54 % de los pacientes (se tiene en cuenta el 32,5 % que han terminado antes y el 20 % de pacientes que no finalizan la vía clínica el día 6).

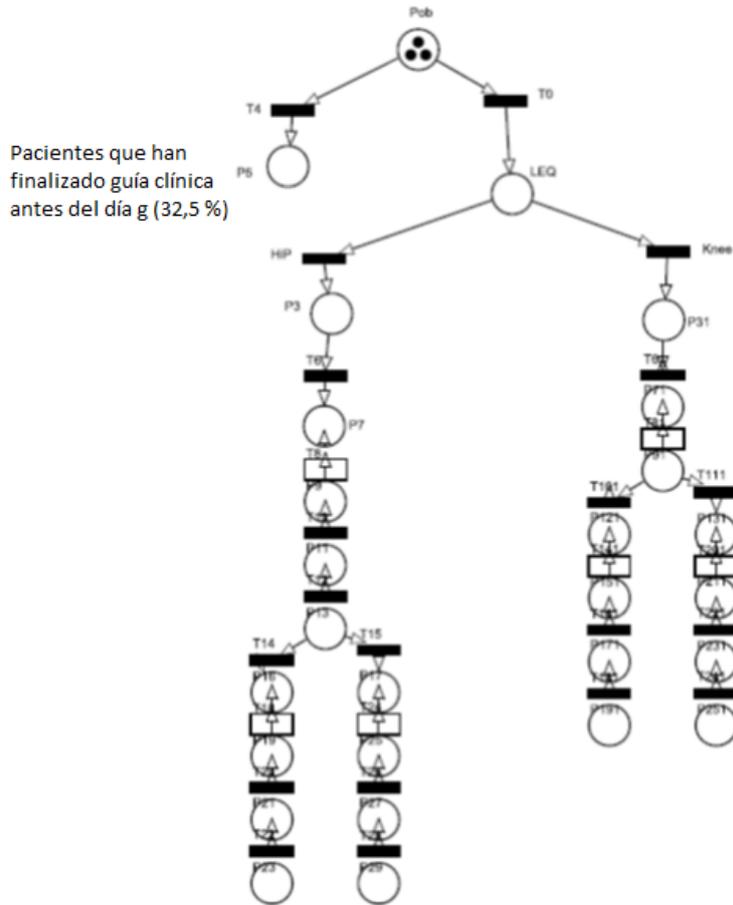


Figura 19: Modelo sin utilización recursos que modela el día 6

Lo primero que se aborda en esta parte es comparar dos situaciones (Tabla 21) en cuanto a los médicos necesarios para llevar a cabo la secuencia del día 1; tenemos dos opciones: la primera en la que se reservan tres médicos únicamente para operar(C) y una segunda en la que los tres médicos están compartidos para todas las actividades del día (B). En la Figura 20 mostramos las dos situaciones más la red de Petri del Día de la operación sin recursos. (A)

Artroplastia de Cadera/Rodilla			
	Nº medio	Probabilidad	Tiempo
<b>Sin recursos(A)</b>	2,642	0,881	480,000
<b>3 médicos(B)</b>	2,180	0,727	480,000
<b>4 médicos(C)</b>	2,361	0,787	480,000

Tabla 21: Comparación de distintas hipótesis para el día 1

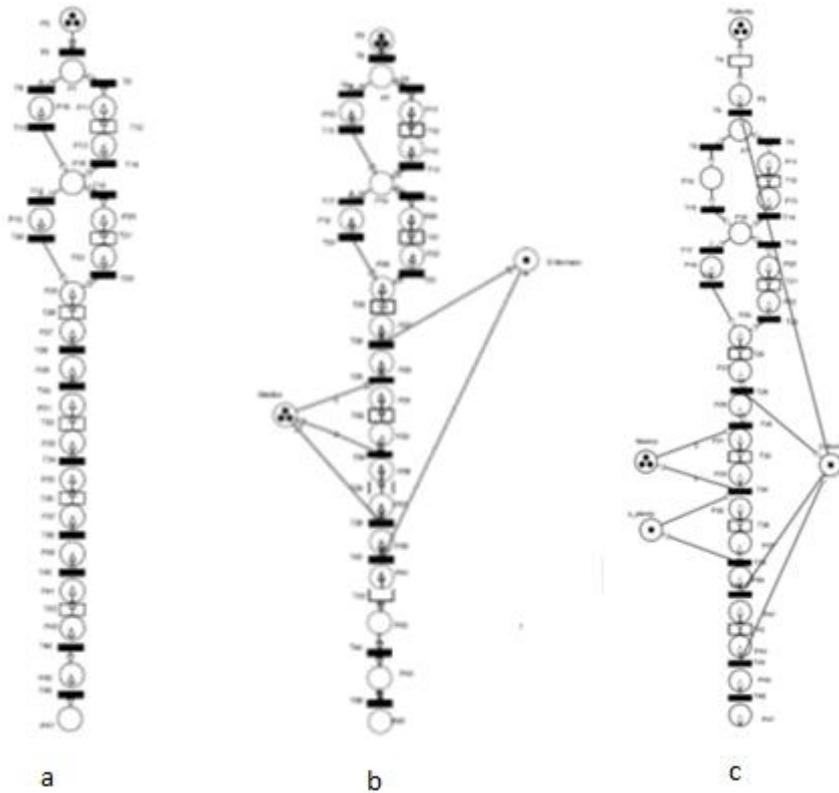


Figura 20: Comparación de modelos del día 1

En el modelo que analizaremos suponemos que hay destinados tres médicos para operar pacientes provenientes de Lista Espera Quirúrgica; la idea era hacer un análisis en este modelo con el equipo completo de trabajo disponible, pero por motivos de tiempo computacional se ha decidido trabajar por secciones ya que el programa TimeNET nos da resultados con mayor rapidez. En la Tabla 22 se observan las distintas actividades que se hacen a diario según la distribución de los días de operación, cabe destacar que los días sábado y domingo no se opera; además, suponemos que no se operan dos días seguidos y que entre días de operación debe haber un día sin tener intervenciones LEQ y utilizar los quirófanos disponibles para otro tipo de intervenciones.

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Día 6	Día 0	<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 0
Día 4	Día 5	Día 6	Día 0	<b>Día 1</b>	Día 2	Día 3

Tabla 22: Distribución de las actividades diarias.

El análisis será diario para los siete días de la semana y se buscará obtener datos sobre la eficiencia del departamento en una semana.

- **Lunes**

La Tabla 23 muestra el número medio de pacientes tratados satisfactoriamente y lo compara con el valor obtenido en la simulación sin utilización de recursos. Se puede ver que el número medio de pacientes tratados cada día disminuye, esto tiene sentido ya que los recursos compartidos implicarán una disminución del rendimiento del sistema.

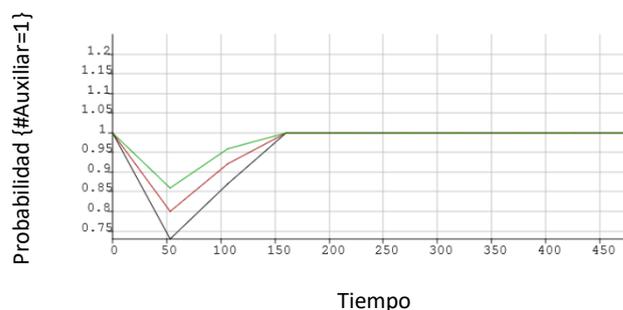
Lunes	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Probabilidad	Nº medio	Probabilidad
Día 1	2,586	0,862	2,642	0,881
Día 4	3,000	1,000	3,000	1,000
Día 6	1,623	0,541	1,640	0,547

**Tabla 23:** Resultados simulación para el día lunes (modelo III) considerando ambas vías. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min por cada día de vía.

En cuanto a los análisis de recursos la probabilidad de que los tres médicos de quirófano estén disponibles tras 480 minutos tiene interés ya que la probabilidad de que acaben de operar antes de los 480 minutos es del 73.167 %. Las imágenes de la evolución de los recursos se adjuntan a continuación.

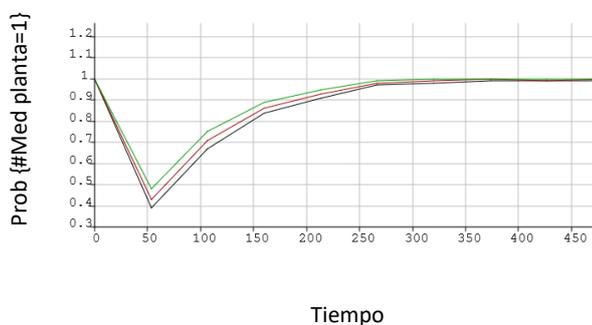
○ Auxiliar

Se puede ver que el recurso auxiliar se va utilizando hasta el minuto 150 en el que acaba su actividad este día en lo referente a estas vías clínicas. Se observan tres funciones, la de abajo es la peor situación ya que hay un intervalo de confianza del 95 %; que dicha curva tenga una probabilidad de cero es que en dicho punto se generara una demora en el proceso; tampoco es una situación que suponga mucho problema ya que los rendimientos de éxito son elevados. La disponibilidad de auxiliar es elevadísima en torno al 75 %, con lo cual el día lunes para este modelo los auxiliares tendrán pocas tareas a realizar. La gráfica muestra la probabilidad de que el número de auxiliares libres sea exactamente 1, con lo cual a partir de los 150 min dicho recurso queda libre.

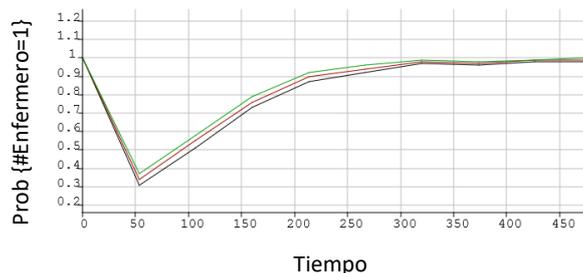


○ Medico en planta

La diferencia está en que la ocupación del médico es mayor y sus actividades terminan en torno a los 300 minutos; y presenta una subida exponencial a diferencia del auxiliar que es una subida más lineal; además el intervalo de situaciones de mayor y menor probabilidad está más concentrado. Según la evolución de la gráfica con un médico en planta sería más que suficiente.



○ Enfermero



Para terminar el análisis del día lunes calculamos el número medio de pacientes que se traten por día; cada día de la semana consta de tres días correspondientes a las vías clínicas, con lo cual el número máximo de pacientes a tratar será 9; la tabla con el número medio de pacientes tratados por semanas es la Tabla 30.

● Martes

Martes	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Promedio	Nº medio	Probabilidad
Día 0	2,866	0,955	2,871	0,957
Día 2	3,000	1,000	3,000	1,000
Día 5	2,190	0,730	2,219	0,740

Tabla 24: Resultados simulación para el día martes (modelo III) considerando ambas vías. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min por cada día de vía.

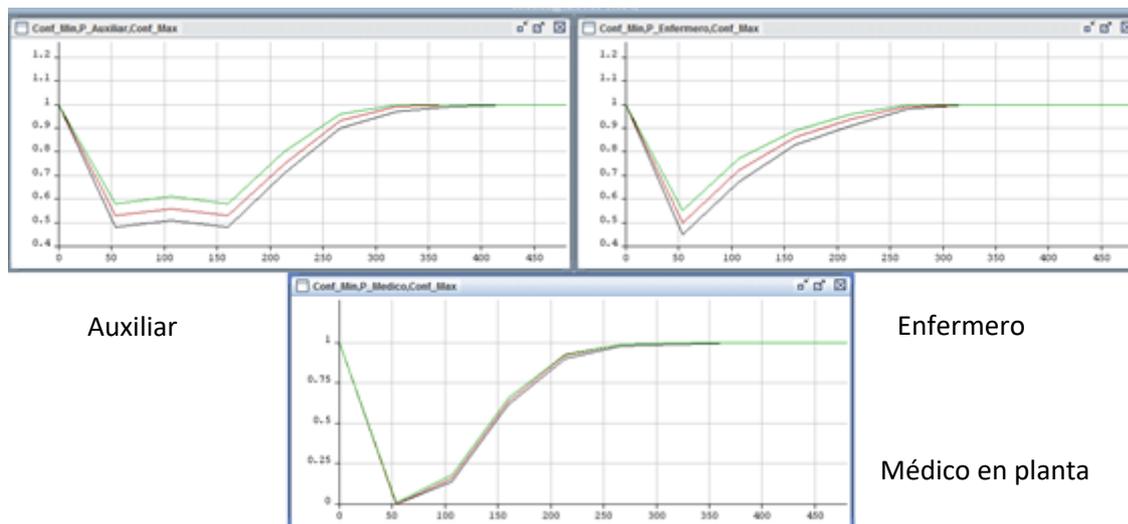


Figura 21: Gráficas disponibilidad de recursos en el día martes

Se puede observar que la disponibilidad de enfermeros y auxiliares es elevada; además de las gráficas superiores de la Figura 21 deducimos que la actividad de dichos recursos se concentra en los 200 primeros minutos. En el día martes, al no haber operaciones el medico en planta cumple con sus actividades en un tiempo cercano a 250 min. El día martes es un día con poca actividad.

- Miércoles

Miércoles	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Promedio	Nº medio	Probabilidad
Día 1	2,577	0,859	2,642	0,881
Día 3	3,000	1,000	3,000	1,000
Día 6	1,625	0,542	1,640	0,547

Tabla 25: Resultados simulación para el día miércoles (modelo III) considerando ambas vías. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min por cada día de vía.

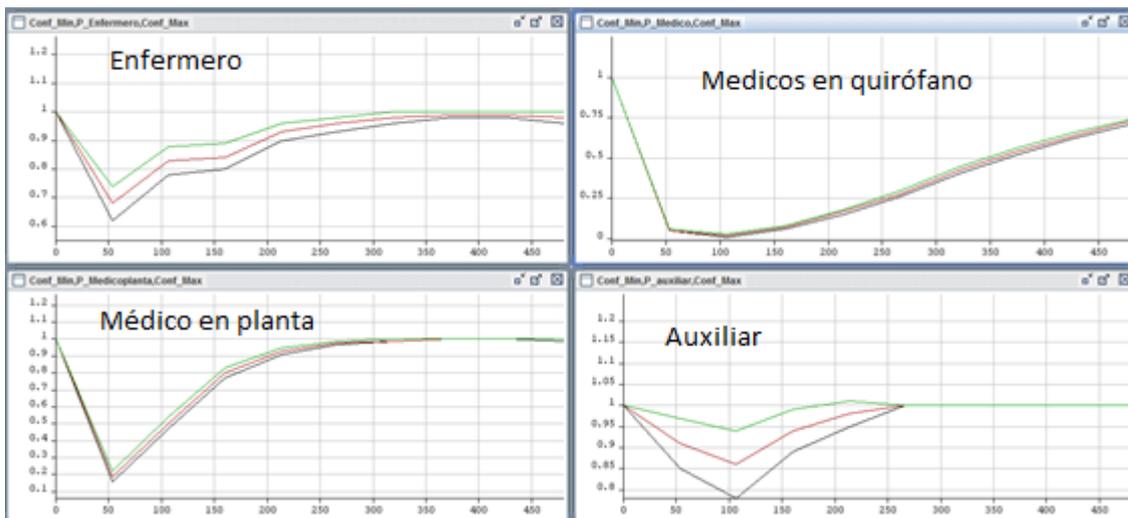


Figura 22: Gráficas disponibilidad de recursos en el día miércoles

En los enfermeros y auxiliares no se tiene problema de disponibilidad y en los médicos, hay un punto, en torno al minuto cincuenta, que la demanda del médico de planta es elevada por lo que deducimos que en ese momento hay varias actividades para dicho médico. No tiene sentido aumentar el número de médicos en planta porque presenta un margen bastante amplio para terminar actividades y como se ve en la Tabla 25, se consiguen buenos rendimientos en cuanto a eficacia de pacientes tratados. Las gráficas obtenidas (Figura 22) tienen una distribución similar a las del día lunes; si se comparan deducimos que el médico en planta tiene más trabajo este día.

La probabilidad de que estén tres médicos desocupados al final del día 0.98; con lo cual el miércoles es muy poco probable que los médicos de quirófano se queden horas extras terminando las operaciones para completar los tres pacientes operados.

- Jueves

Jueves	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Promedio	Nº medio	Probabilidad
Día 0	2,849	0,95	2,871	0,957
Día 2	3	1	3	1
Día 4	3	1	3	1

Tabla 26: Resultados simulación para el día jueves (modelo III) considerando ambas vías. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min por cada día de vía.

En cuanto a las gráficas (Figura 23) se puede observar los 200 primeros minutos el médico tiene bastantes actividades a realizar y un margen amplio para cumplimentar sus actividades. Es el día con menor cantidad de trabajo y mayor probabilidad de éxito.

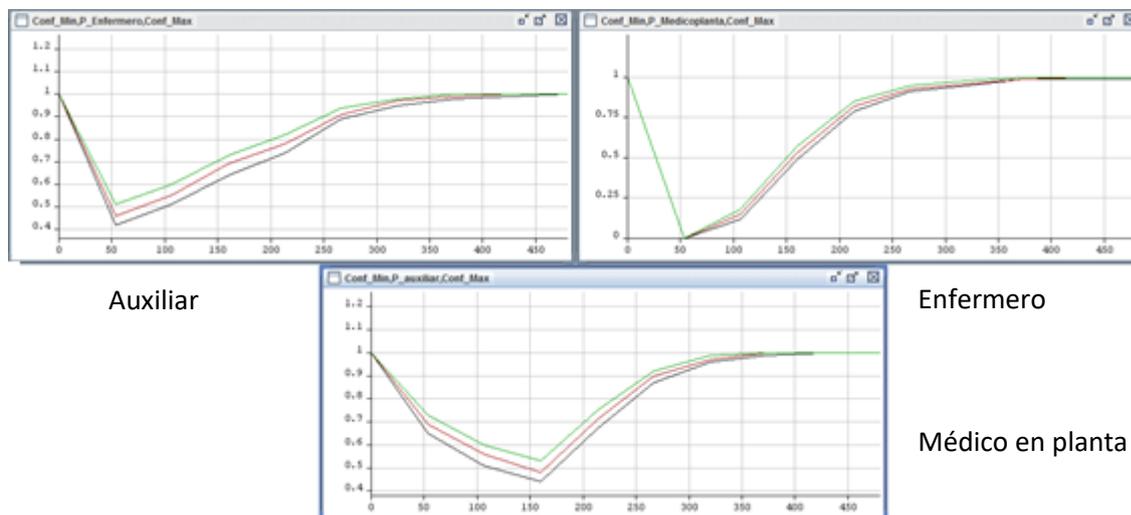


Figura 23: Gráficas disponibilidad de recursos en el día jueves

- Viernes

Viernes	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Promedio	Nº medio	Probabilidad
Día 1	2,592	0,864	2,642	0,880
Día 3	3	1	3	1
Día 5	2,160	0,72	2,219	0,739

Tabla 27: Resultados simulación para el día viernes (modelo III) considerando ambas vías. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min por cada día de vía.

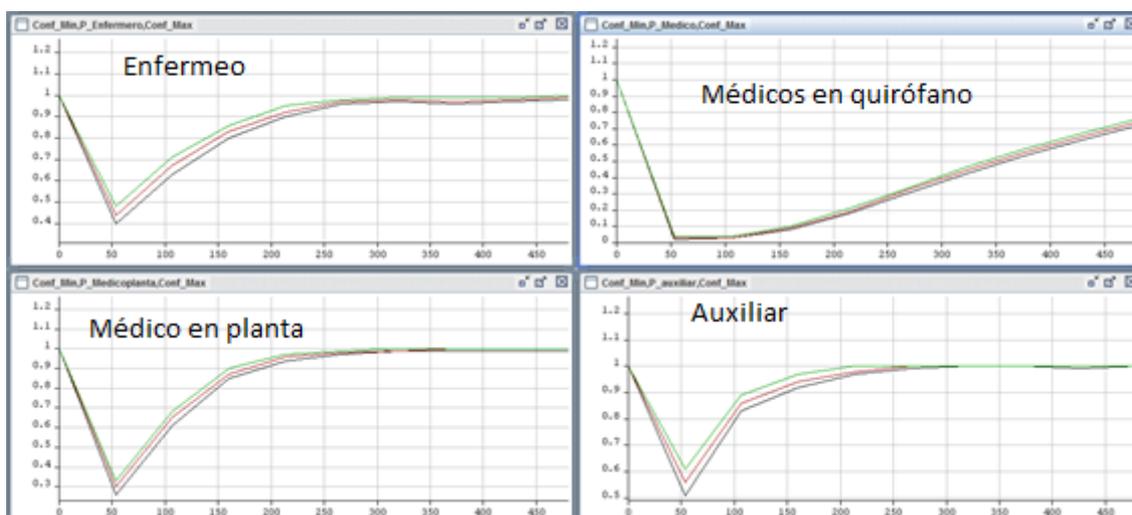


Figura 24: Gráficas disponibilidad de recursos en el día viernes

- Sábado

Sábado	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Promedio	Nº medio	Probabilidad
Día 2	3	1	3	1
Día 4	3	1	3	1
Día 6	1,586	0,529	1,64	0,546

Tabla 28: Resultados simulación para el día sábado (modelo III) considerando ambas vías. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min por cada día de vía.

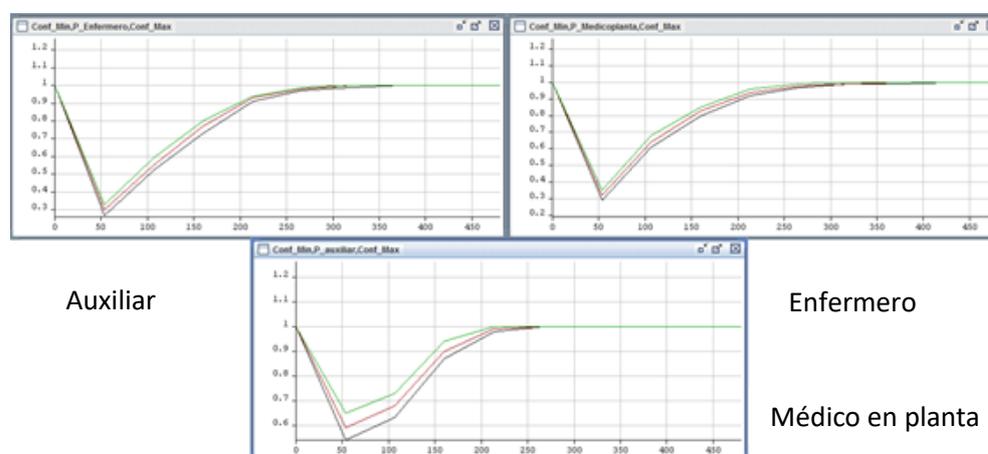


Figura 25: Gráficas disponibilidad de recursos en el día sábado

- Domingo

Domingo	Con recursos		Sin recursos	
	Nº medio	Promedio	Nº medio	Probabilidad
Día 0	2,859	0,953	2,871	0,957
Día 3	3,000	1,000	3,000	1,000
Día 5	2,216	0,739	2,219	0,740

Tabla 29: Resultados simulación para el día domingo (modelo III) considerando ambas vías. Nº medio: número medio de pacientes atendidos satisfactoriamente en 480 min; Probabilidad: Probabilidad de tratar 3 pacientes satisfactoriamente en 480 min por cada día de vía.

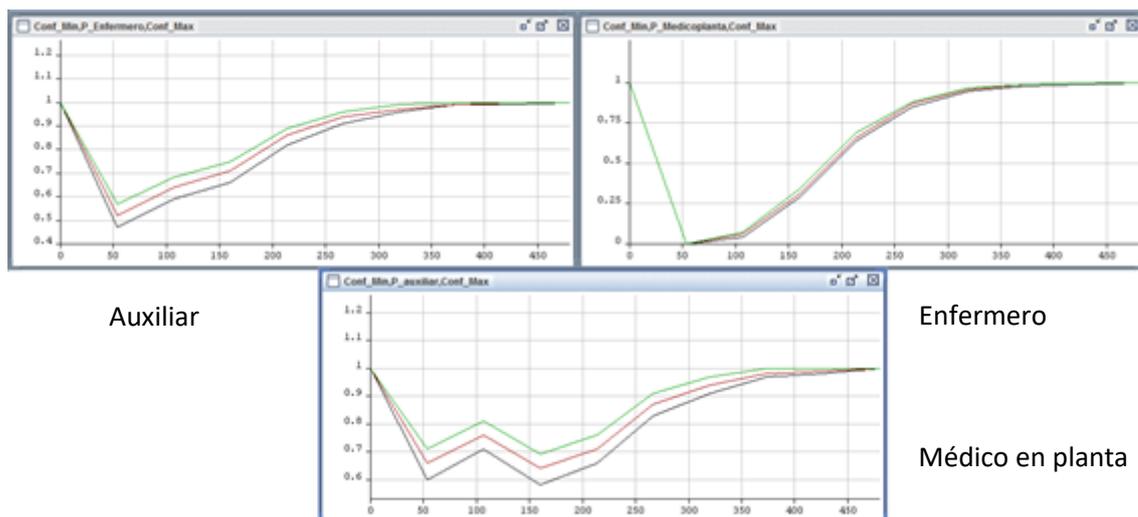


Figura 26: Gráficas disponibilidad de recursos en el día domingo

Para terminar la simulación de este modelo adjuntamos la Tabla 30 con el número medio de pacientes que se trata cada día; este número medio se obtiene conectando los lugares finales de cada día de las diferentes vías clínicas con un lugar, que englobe todos los pacientes tratados satisfactoriamente; la situación ideal sería tratar a nueve pacientes diarios en ocho horas, ya que se realizan actividades correspondientes a tres días pero hay fallos, hay pacientes que terminan antes del día seis, pacientes que continúan más días a partir seis, hay días en los que se necesitan más de ocho horas para operar a tres pacientes, etc. Los recursos utilizados son cuatro médicos (tres destinados a quirófano y uno cumplimentando actividades en planta), un enfermero y un auxiliar.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
<b>Nº pacientes medio</b>	7,209	8,055	7,201	8,849	7,752	7,587	8,075

Tabla 30: Tabla que recoge el número medio de pacientes tratados cada día

Se puede observar que los días martes, jueves y domingo se atiende un mayor número de pacientes, sobre todo el día Jueves que se atienden los pacientes casi en su totalidad salvo el fallo de la vía clínica que puede existir si un paciente no puede iniciar la vía clínica por alguna infección. El resto de días presentan un solo día que implica fallo o que el paciente haya terminado satisfactoriamente. Los días que menos pacientes se tratan en ocho horas son los días que se opera.



# Anexo III:

# Ampliación Fundamentos

# Teóricos

---

## Anexo III.A Vías Clínicas

Normalmente en la práctica clínica existe una gran variabilidad, tanto en la utilización de los recursos sanitarios, como en los resultados obtenidos; dichos resultados son atribuidos a los diferentes servicios y procesos que se llevan a cabo ya que no todos los procesos son iguales y cada patología presenta sus particularidades. Otra fuente de variación es la diferencia que se establece entre distintos centros hospitalarios; cabe resaltar que la causa más importante es la debida a disfunciones en la prestación de servicios de atención a los enfermos.

Las vías clínicas [2], representan una posible solución para este tipo de variabilidad, definiendo la secuencia y duración de las actividades desarrolladas por médicos, enfermeras y otros profesionales, además de la responsabilidad óptima de cada recurso en la realización un procedimiento particular, minimizando retrasos, mejorando el uso de recursos y maximizando la calidad de la asistencia.

La vía clínica es una herramienta de gestión clínica para facilitar la atención sistemática del paciente. Pueden desarrollarse para la atención antes, durante y/o después de la hospitalización, en el caso de las vías clínicas seguidas en Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HCU estas abarcan los tres espacios temporales centrándose en los días y cuidados necesarios durante la hospitalización, y permiten la anticipación de los problemas surgidos durante el desarrollo de actividades, la evaluación de los objetivos planteados, la comparación con los estándares de atención definidos previamente y la innovación en las soluciones.

La representación de las vías clínicas es variada, una de ellas puede ser la de una matriz temporal, se puede ver en la Figura 27; en el eje de las abscisas se coloca el tiempo en divisiones por días o incluso horas y la ubicación del enfermo, mientras en el eje de las ordenadas se distribuyen todas las acciones e intervenciones cuidadosamente distribuidas (evaluaciones y asistencias, determinaciones o tests de laboratorio, tratamientos médicos y cuidados de enfermería, medicación, actividad, fisioterapia, dieta, información y apoyo al enfermo y/o familiar, criterios de ingreso o de alta.

DIAS	1 INGRESO PLANTA	2 REANIMACION PLANTA	3 4 5 PLANTA	6 ALTA PLANTA
EVALUACIONES Y ASISTENCIAS				
DETERMINACIONES O TEST				
TRATAMIENTOS MEDICOS Y CUIDADOS DE ENFERMERIA				
MEDICACION				
ACTIVIDAD				
DIETA				
INFORMACION				
CRITERIO DE ALTA O DE INSTRUMENTACION				

Figura 27: Representación matricial de vía clínica

### A.1 Procesos y objetivos

- Establecer para todos los pacientes independientemente del médico responsable, una secuencia de actuaciones basada en las consideraciones de los médicos y en la experiencia, es decir, la vía clínica es un conjunto de actividades consensuadas por una comisión de médicos, los cuales consideran que esas actividades son las necesarias para llevar a cabo una estandarización en el tratamiento de pacientes; conforme se van tratando pacientes y con los resultados obtenidos se pueden añadir o suprimir actividades.
- Coordinar la utilización de recursos al definir las actividades del día a día en la atención del enfermo y quién es el responsable de realizar cada actividad. Es importante el reparto de tareas para evitar roces entre los profesionales, indefinición de responsabilidades etc. con lo que se deteriora el ambiente laboral y la atención al paciente.
- Basar la atención a un paciente con una patología determinada en la mejor evidencia disponible y constituir un compromiso de atención por parte de la institución, lo que proporciona a los profesionales seguridad legal ante demandas por mala práctica; al estar estandarizado el proceso es un método de defensa ante cualquier inconveniente legal.
- Informar al paciente y familiares de lo que pueden esperar día a día así como establecer un compromiso de la institución con su atención y cuidado. La necesidad de atención sanitaria supone, tanto para el paciente como para los familiares o allegados, una situación de ansiedad e incertidumbre ante los resultados de dicha atención así como por la secuencia de procedimientos a llevar a cabo, con la información detallada se ha demostrado que se disminuye la ansiedad y mejora la calidad percibida.
- Constituir una poderosa herramienta educativa para residentes y médicos en formación al proporcionar una visión global del plan de atención y cuidados del enfermo y del proceso de toma de decisiones a la luz de la información disponible hasta el momento.
- Simplificar y sistematizar el registro de información en los documentos de la vía clínica que forman parte de los documentos de la historia clínica del paciente. La información registrada en las historias clínicas supone la fuente de datos para evaluar la mejora de calidad asistencial.
- Reducir la frecuencia de efectos adversos derivados de la hospitalización e instrumentación. Los efectos adversos de la hospitalización de un paciente derivan, en gran medida, del mero hecho de estar hospitalizado así como de las instrumentalizaciones a las que se ve sometido, por lo que éstos se reducen al acortar la estancia y simplificar la instrumentación que se realiza al enfermo.

- Reducir los costes asociados a la estancia hospitalaria e instrumentación. La eficiencia se deriva de la competencia de los profesionales que especifican lo correcto en la forma correcta, de la verificación de la efectividad, adecuación, seguridad, aceptabilidad y justo a tiempo de los procesos establecidos.

Objetivos	Procesos
Disminuir la variabilidad clínica	Establecer la secuencia de las actividades. (Matriz)
Proporcionar seguridad legal a los profesionales y asegurar la efectividad	Basar la atención sanitaria en la mejor evidencia disponible (Hoja de tratamiento y variaciones)
Mejorar la indefinición de responsabilidad	Expresar la coordinación del equipo asistencial
Mejorar la satisfacción del paciente y familiares, disminuir ansiedad y angustia	Proporcionar al enfermo y/o familiar la información de la asistencia sanitaria.(Gráficos)
Promover la formación global y actualizada de los profesionales	Exponer una visión global del plan de atención y cuidados.
Mejorar los registros de información y evaluar sin sesgos de información	Sistematizar la recogida de la información.(Hojas de verificación, variaciones y encuesta de satisfacción)
Fomentar la mejora continua de la asistencia	Verificar de los resultados obtenidos y comparación con estándares de calidad.(Indicadores y estándares)
Fomentar la investigación clínica	Igualar las condiciones de atención sanitaria
Mejorar la calidad asistencial, al disminuir los efectos adversos y complicaciones que derivan de la hospitalización	Adecuar la estancia, instrumentación o duración de la asistencia sanitaria, siguiendo lo correcto, en la forma correcta y justo a tiempo.
Conseguir la eficiencia y adecuar la utilización de recursos a las necesidades.	Verificar los costes asociados a la hospitalización o utilización de recursos diagnósticos o terapéuticos.

Tabla 31: Proceso y objetivos de la vía clínica

## A.2 Inconvenientes y/o dificultades:

- Falta de cultura de trabajo en equipo y mejora continua.
- Dificultad en el desarrollo de la vía clínica, por falta de experiencia, por la innovación que conlleva.
- Resistencia al cambio de los profesionales, no acostumbrados a evaluación continua, por lo que se requiere un periodo de implantación.
- Dificultad de indicación en un determinado enfermo a adscribirle a la vía clínica.
- Dificultad en la elección adecuada del coordinador de la vía clínica, profesional comprometido en la implantación y desarrollo adecuado de la misma.

Es fundamental el análisis de las variaciones, que conlleva los cometidos siguientes:

- Determinar y reflejar en la documentación la variación que impida el objetivo: salud y satisfacción del enfermo y familiar y satisfacción de los profesionales.
- Determinar la causa de la variación.
- Encontrar la/s solución/es a la variación.
- Analizar e investigar las variaciones que aparecen en el conjunto de enfermos atendidos durante el periodo de implantación.
- Redefinir la vía clínica, teniendo en cuenta la experiencia acumulada
- Las variaciones de han de clasificar en: Evitables, no evitables y mixtas. Asimismo se han de agrupar en dependientes de la condición del enfermo, de la familia, del personal sanitario, etc.

## Anexo III.B Tipos de sistemas

Las características del sistema real que se va a estudiar condicionan el tipo de simulación y análisis a desarrollar. Por lo tanto, conviene hacer una clasificación de los sistemas en base a los

aspectos que van a condicionar su análisis posterior [14]. Así, es útil realizar una clasificación de los sistemas atendiendo a tres aspectos fundamentales:

- **Sistemas estáticos y sistemas dinámicos.** Un sistema se considera estático cuando sus variables de estado no cambian a lo largo del tiempo, es decir, cuando el tiempo no juega ningún papel en sus propiedades. Por el contrario, en un sistema dinámico los valores que toman todas o algunas de sus variables de acción evolucionan a lo largo del tiempo.
- **Sistemas deterministas y sistemas estocásticos.** Si un sistema no tiene ningún componente con características probabilísticas (es decir, aleatorias) se considera determinista; en este caso, el comportamiento del sistema se determina una vez que se hayan definido las condiciones iniciales y las relaciones que existen entre sus componentes. Por el contrario, un sistema no determinista o estocástico tiene algún elemento que se comporta de forma aleatoria, no estando predeterminado su comportamiento en función de las condiciones iniciales y de las relaciones entre sus componentes. En este caso, el sistema sólo se podrá estudiar en términos probabilísticos, consiguiendo, en el mejor de los casos, conocer sus respuestas posibles con sus probabilidades asociadas.
- **Sistemas continuos y sistemas discretos.** En un sistema continuo las variables de estado cambian de forma continua a lo largo del tiempo, mientras que en uno discreto cambian instantáneamente de valor en ciertos instantes de tiempo. En un sistema de una cierta complejidad puede ocurrir que existan simultáneamente variables de estado continuas y discretas.
- **Sistema concurrente:** Es un sistema en el que la concurrencia juega un papel importante. La definición de concurrencia es: coincidencia en el espacio y en el tiempo de dos o más personas o cosas. En cuanto a informática, se habla de concurrencia cuando hay una existencia simultaneidad de varios procesos en ejecución; cabe destacar que existencia simultánea no implica ejecución simultánea. Cuando ocurre la ejecución simultánea de dos procesos se habla de paralelismo que es un caso particular de concurrencia.

Nos podemos encontrar con dos tipos de sistemas concurrentes:

- Sistemas inherentemente concurrentes: el entorno con el que interactúan, o el entorno que modelan tiene forzosamente actividades simultáneas, por ejemplo en el entorno sanitario, unos médicos se dedican a operar y otros simultáneamente se dedican a pasar consulta, a hacer revisiones en trauma, etc.
  - Sistemas potencialmente concurrentes: no es estrictamente necesario que haya concurrencia, pero se puede sacar partido de ella. En los sistemas que tratamos que haya solo una sección o grupo de médicos realizando actividades nos daría resultados, pero tener a tres grupos trabajando en simultáneo nos permitiría obtener mejores resultados, mientras haya disponibilidad de recursos.
- **Sistema distribuido:** Un sistema distribuido se define como un grupo de diferentes grupos de máquinas/trabajadores separados; cada grupo es independiente y realiza sus propios trabajos, pero debe estar englobado en una estructura común.

Ventajas de sistemas distribuidos

- compartición de recursos dispersos
- ayuda al trabajo cooperativo de equipos humanos
- aumento de velocidad de ejecución escalabilidad ilimitada
- aumento de fiabilidad:

- tolerancia a fallos
- Alta disponibilidad

Se comete un error al referirnos a los sistemas con los que trabajamos como sistemas continuos o discretos, ya que esta clasificación se refiere al modelo; una RdP es un modelo matemático para el análisis de sistemas de eventos discretos (SED).

### Anexo III.C Redes de Petri P/T

Las RdP son un formalismo bien conocido para modelar, analizar y diseñar sistemas de eventos discretos. Los sistemas de eventos discretos que se caracterizan por ser concurrentes, asíncronos, distribuidos, paralelos, no deterministas y/o estocásticos se pueden modelar y analizar por medio de las RdP (en el anexo III.B se describen los distintos tipos de sistemas). En este tipo de redes, se utilizan marcas para simular las actividades dinámicas y simultáneas de sistemas. Como herramienta matemática, es posible establecer ecuaciones de estado, ecuaciones algebraicas, y otros modelos matemáticos que rigen el comportamiento de los sistemas. Una red de Petri (RP) es una 4-tupla  $(P, T, I, O)$  [8], [10], [11],[15].

- P es un conjunto finito y no vacío de lugares
- T es un conjunto finito y no vacío de transiciones
- $P \cap T = \emptyset$ ; es decir, lugares y transiciones son conjuntos disjuntos.
- I es una función que define el peso de la entrada entre lugares y transiciones. Otra forma de definir a la función I es  $\alpha = P \times T \rightarrow \mathbb{N}$
- O es una función que define el peso de la salida entre lugares y transiciones.  $\beta = P \times T \rightarrow \mathbb{N}$

Otra forma de referirnos a una RdP es  $N = \langle P, T, Pre, Post \rangle$ , donde Pre es la matriz de Preincidencia y Post es la matriz de Postincidencia en  $\mathbb{N}$ .

Un sistema de red de Petri (RdP) consta de dos elementos: un grafo bipartito dirigido y un marcado.

Gracias a la existencia de potentes teorías de análisis y síntesis, así como a su directa representatividad gráfica, las redes de Petri constituyen uno de los formalismos más aceptados en las aplicaciones de ingeniería en las que se trabaja con modelos (de eventos) discretos. No obstante, a veces surgen problemas de decisión o, en sistemas con grandes poblaciones, de enorme complejidad computacional es difícil obtener una solución.

Una RdP tiene dos formas de representación: representación gráfica y matricial.

- Gráficamente la RdP se representa como un grafo bipartito orientado: los lugares se representan como circunferencias, y las transiciones como barras o rectángulos. Existe un arco que va del lugar  $p_i$  a la transición  $t_j$  si y sólo si  $\alpha(p_i, t_j) \neq 0$  (función que define el peso de la entrada entre lugares y transiciones); análogamente, existe un arco que va de la transición  $t_j$  a la transición  $p_i$  si y sólo si  $\beta(t_j, p_i) \neq 0$  (función que define el peso de la salida entre lugares y transiciones). Cada arco se etiqueta como un número entero natural,  $\alpha(p, t)$  o  $\beta(t, p)$ , que se denomina como peso del arco.

- Una red se representa matricialmente por medio de la matriz de Preincidencia ( $C^- = [\alpha(p_i, t_j)]_{n \times m}$ ) y Postincidencia ( $C^+ = [\beta(t_j, p_i)]_{n \times m}$ ).

La matriz de Preincidencia **Pre**  $[p, t] = w > 0$  significa que hay un arco que va de un lugar  $p$  a la transición  $t$  con peso o multiplicidad  $w$ , y la matriz de Post-incidencia **Post**  $[p, t] = w > 0$  representa un arco que va desde la transición  $t$  al lugar  $p$  con peso  $w$ .

Una red de Petri es ordinaria si sus matrices de incidencia sólo pueden tomar valores 0 y 1 (todos sus arcos son de peso unitario). Suponemos una red ordinaria para facilitar el cálculo de la matriz de incidencia, con lo cual se ha establecido un modelo parecido al día 6 de la vía clínica fractura, se muestra en la Figura 31, y se ha obtenido su matriz de incidencia utilizando la herramienta para Matlab Petri Net Toolbox.

$$C = C^+ - C^-$$

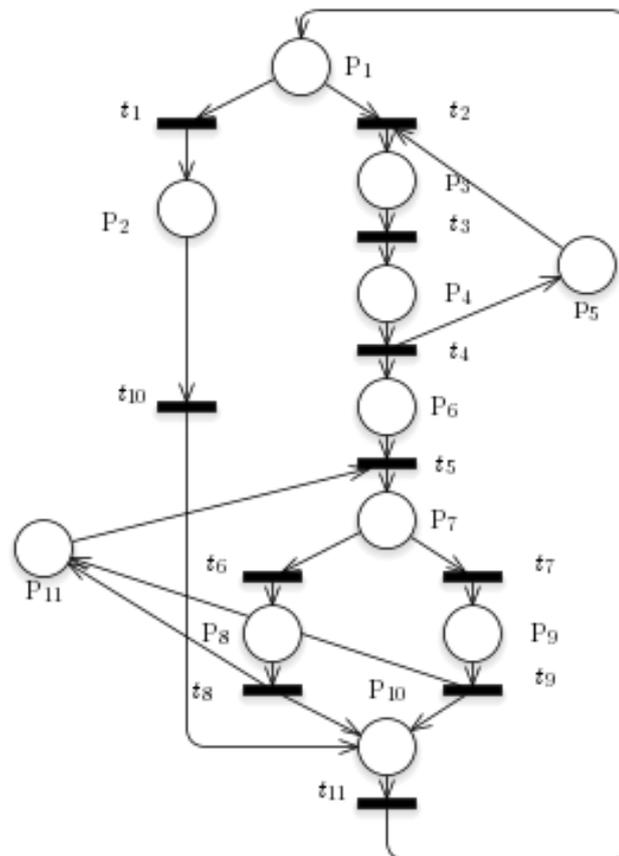


Figura 28: RdP ordinaria similar al día 6 de la vía clínica cadera

Post =

```

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0
    
```

Pre =

```

1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
    
```

C =

```

-1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0
0 1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 -1 0 0 0 0 0 0 0
0 -1 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 -1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 -1 -1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 -1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 -1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 -1
0 0 0 0 -1 0 0 1 1 0 0
    
```

El estudio de las redes de Petri con las que trabajaremos lo dividiremos en:

- Análisis estructural

El análisis de las RdP con ayuda del algebra lineal ha hecho posible el estudio de una red en forma independiente de su marcado inicial, con lo cual si la propiedad se cumple, dicha propiedad será válida para cualquier marcado inicial. Con el análisis estructural se verifica que el modelo sea correcto, mediante los P- y T- semiflujo.

Algunas propiedades [15] son:

- La vivacidad es una propiedad relacionada con la disparabilidad potencial de las transiciones en todos los marcados alcanzables. Una transición es viva si es potencialmente disparable en todos los marcados alcanzables. En otras palabras, una transición es viva si nunca pierde la posibilidad de disparo (es decir, de realizar una actividad). Una transición  $t$  es potencialmente disparable en  $m$  si existe una secuencia de disparo  $\sigma$  que lleva a un marcado  $m'$  en el cual  $t$  está habilitada, es decir:  $m \xrightarrow{\sigma} m' \geq \text{Pre} [P, t]$ . Una RdP es viva si todas sus transiciones son vivas.
- Una RdP es estructuralmente viva si existe al menos un marcado inicial vivo.
- En los marcados de bloqueo todas las transiciones están muertas, así que ninguna puede ser disparada. Un sistema se dice que está libre de bloqueos (es decir, para cualquier marcado alcanzable) si al menos siempre se puede disparar una transición.

- **Análisis de comportamiento/dinámico**

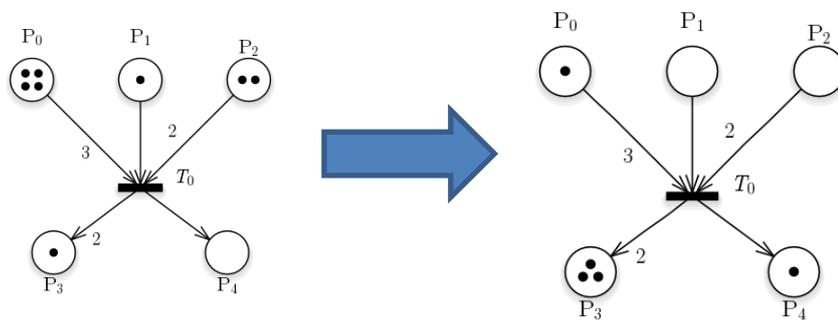
El marcado de una red  $R$  es una aplicación de  $P$  en  $\mathbb{N}$ , es decir, la asignación de un número entero no negativo (número de marcas) a cada lugar. La variación de la RdP a partir de un marcado inicial le confiere un carácter dinámico. La RdP marcada se puede definir como una 5-tupla  $(P, T, \alpha, \beta, M_0)$ .

Cada modelo dinámico dispone de: variables de estado, una forma de memorización del pasado dinámico (discreta, mediante una codificación o numérica). En nuestro caso trabajamos con redes de Petri, en las que el estado de dicha red es el marcado; el estado se codificará con variables numéricas o polinómicas según el tipo de redes de Petri con las que se trabaje.

En un RdP marcada hay una regla de evolución del marcado, que se basa en el disparo de una transición sensibilizada, que consiste en eliminar  $\alpha(p, t)$  marcas a cada lugar  $p \in {}^*t$  y añadir  $\beta(t, p)$  marcas a cada lugar  $p \in t^*$ .  $M_i \xrightarrow{t} M_j$  Significa que  $t$  está sensibilizada en  $M_i$  y que al disparar  $t$  a partir de  $M_i$  se alcanza  $M_j$ . Representación matemática del disparo de transición:

$$M_j(p) = M_i(p) + \beta(t, p) - \alpha(p, t) \quad \forall p \in P$$

La Figura 29 representa el disparo de la transición  $t$ .



**Figura 29: Disparo de una transición**

Un marcado  $M$  es alcanzable a partir de un marcado inicial si y sólo si existe una secuencia de disparos aplicable a partir del marcado inicial que transforma  $M_0$  en  $M$ :  $M_0 \xrightarrow{\sigma} M$ .  $\sigma$  es el vector que refleja la secuencia de transiciones disparadas para llegar a un determinado marcado.

Una vez aquí se define la ecuación de estado de una red de Petri.

$$M_k = M_{k-1} + C * \sigma$$

Esta ecuación nos permite plantear diversos análisis sobre el comportamiento de la RdP utilizando técnicas de algebra lineal, pero presenta dos limitaciones: no todo vector de transiciones es admisible y la definición de dicho vector conlleva una pérdida de información para estudiar la actividad de la red.

En cuanto a las extensiones de las redes de Petri encontramos:

- Redes de Petri generalizadas (General Stochastic Petri Nets-GSPN-); se utilizan en la modelación de sistemas a un nivel elevado y con respecto a las RdP ordinarias introducen el concepto de peso de un arco distinto de 1.
- Red de Petri con arcos inhibidores, es una red a la que se añaden arcos inhibidores; es una 5-tupla  $(P, T, I, O, H)$  en la que  $H$  es una función que representa el peso de los arcos inhibidores entre lugares y transiciones. Un arco representa la lógica negada y se dispara la transición cuando el número de marcas sea menor al peso del arco, en el ejemplo de la Figura 30 se disparará cuando se tengan menos de dos marcas en el lugar  $P_2$ .

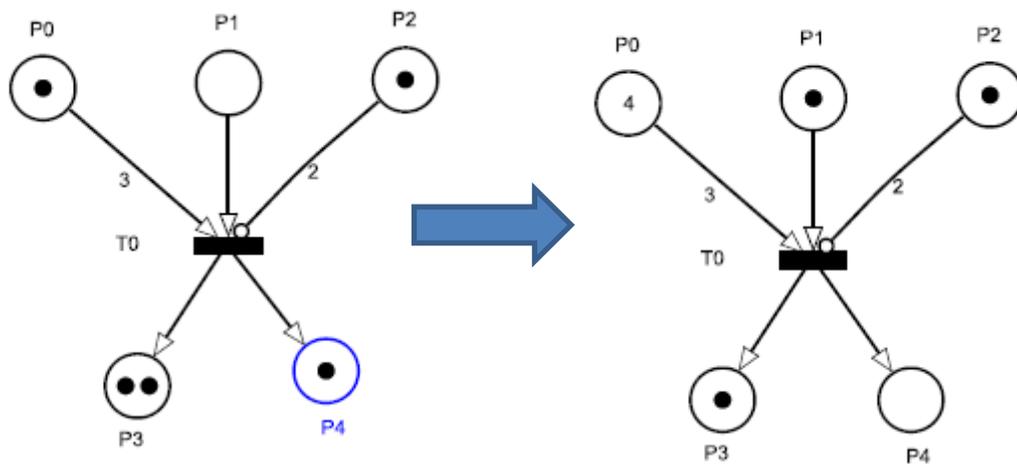


Figura 30: Disparo de transición con arco inhibidor

- Redes de Petri Temporizadas, son aquellas redes que disponen de transiciones con un comportamiento temporal, en nuestro caso trabajaremos con transiciones exponenciales.
- Redes coloreadas permiten establecer diferencias entre las marcas de la red

Estas extensiones se mezclan en el modelo que se utilizará para el análisis de los modelos matemáticos obtenidos con la herramienta HEAT.

### Anexo III.D Stochastic Well-Formed Nets (SWN)

Stochastic Well-Formed Net (SWN) [13] es una extensión de las redes coloreadas que le permite a uno crear una representación más compacta y paramétrica de un sistema simétrico. De esta manera es posible representar sistemas muy concisos que habrían requerido una enorme red sin colorear. Cuando las subredes similares son plegadas, se necesita alguna indicación adicional para distinguir las marcas que terminan estando en el mismo lugar plegado. Estas indicaciones constituyen la estructura de color de la red.

Una Stochastic Well-Formed Nets (SWN) [9] es una red de Petri de alto nivel  $N = \langle P, T, C, D, W^-, W^+, W^h; \phi; \Pi; \Omega; M_0 \rangle$ , donde:

- P es un conjunto finito y no vacío de lugares;
- T es un conjunto finito y no vacío de transiciones;
- C es un conjunto de clases de color básicas.  $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ . Las clases de colores básicas son conjuntos finitos y desacoplados; cada clase  $C_i$  se puede dividir en varias subclases (desacopladas) estáticas  $C_i = C_i^1 \cup \dots \cup C_i^{k_i}$  cuando sea necesario hacer una distinción entre los grupos de colores de cada clase.
- D es una función que asocia un dominio de color para cada lugar de la red. Los dominios de color se expresan como el producto cartesiano de las clases de colores básicas; las marcas en un lugar  $p \in P$  incorporan información y pueden ser vistas como estructuras de datos cuyo tipo es el dominio del color del lugar p. En lo que respecta a los modelos con los que trabajamos D tiene información sobre los pacientes y recursos usados en cada lugar.
- $W^-, W^+, W^h$  son funciones de entrada, salida y arcos inhibidores. Las clases en el dominio de color definen los tipos de variables (etiquetas) que se asocian a la transición.

Las transiciones pueden ser vistas como procedimientos con parámetros formales en donde los parámetros son determinados mediante el dominio correspondiente a dicha transición. El control permitido de una transición y el cambio de estado provocado por el disparo de la misma depende de las variables de arco que etiquetan los arcos que conectan la transición al lugar de entrada, inhibidor o lugar de salida.

- $\phi$  es una función que asocia a cada  $t \in T$  transición una expresión de guarda: las expresiones de guarda se utilizan para restringir el conjunto de instancias de color admisibles de una transición a aquellas que satisfacen un predicado dado. Un predicado se expresa en términos de predicados estándar y es una expresión booleana. Por defecto,  $\phi(t) = true$  es asumido/supuesto.
- $\Pi$  es la función prioritaria que asigna un nivel prioritario a cada transición. Las transiciones temporizadas se representan gráficamente por casillas blancas y se caracterizan por tener prioridad cero. Los niveles de prioridad mayores que cero se reservan, en cambio, para transiciones inmediatas, representados gráficamente como cajas negras finas.
- $\Omega$  es una función que asocia a cada transición temporizada una tasa (media) de disparo, que es el parámetro de la función de distribución probabilística exponencial negativa que caracteriza el retraso del disparo al azar de la transición, y para cada transición inmediata se asocia un peso. Los pesos de transición se utilizan para la resolución probabilística de conflictos entre las transiciones inmediatas con la misma prioridad (por ejemplo; ¿Presenta alguna infección? 90% No, 10% si).

- $M_0$  es la función de marcado inicial que asigna a cada lugar un dominio de color o un parámetro. El parámetro  $nP$  establece un valor simbólico de marcado  $\langle S \rangle$ , que corresponde a la suma formal  $\langle p_1 \rangle + \dots + \langle p_n \rangle$ . El lugar inicial de la guía clínica inicialmente contiene  $N$  fichas, una por cada color en el dominio de color  $P$ .

Las marcas ya no son indistinguibles: cada marca puede considerarse como un ejemplo de una estructura de datos cuyo significado depende del lugar al que pertenece la marca.

Las funciones de arco son sumas formales de tuplas estructuradas de acuerdo al dominio de color del lugar correspondiente. Si el dominio de color del lugar es el producto cartesiano de las  $k$  clases de color básicas, entonces la correspondiente función de arco es una suma ponderada de  $k$ -tuplas. En el caso de la actividad operación que necesita tres médicos, con lo cual el dominio de dicha transición y su lugar de entrada y salida es  $\text{dominio}_{\text{operacion}} = \text{Medico}_0 \times \text{Medico}_1 \times \text{Medico}_2 \times \text{Patient}$ ; entonces los arcos que conectan la transición a los lugares estarán asociados a la siguiente función  $\langle \text{Medico}_0 \rangle + \langle \text{Medico}_1 \rangle + \langle \text{Medico}_2 \rangle + \langle \text{Patient} \rangle$

Uno de los principales intereses de SWNs es que proporcionan un marco de modelado en el que las simetrías intrínsecas son automáticamente detectadas y utilizadas de forma natural como una manera para reducir el tamaño del espacio de estado subyacente. La reducción se obtiene gracias al concepto original de marcado simbólico. Informalmente un marcado simbólico corresponde a una clase de equivalencia que representa un conjunto de marcados ordinarios que se caracterizan por un comportamiento futuro común.

Los marcados simbólicos se obtienen al hacer caso omiso de las identidades de los objetos dentro de los lugares de la red y teniendo en cuenta sólo su número. Las clases de color son repartidas en subclases dinámicas y la única información relevante es la cardinalidad de estas subclases (es decir, el número de objetos que contienen). Esto muestra el número de elementos en la red tienen el mismo comportamiento al mismo tiempo.

Este tipo de división varía de un marcado a otro, por lo que no debe confundirse con la partición estática de subclases que es parte de la definición de clase de color.

Con la introducción de las subclases dinámicas los lugares contienen marcas coloreadas, pero marcas simbólicas cuyos componentes son expresados en términos de subclases dinámicas. Todos los marcados ordinarios que se pueden obtener mediante la asignación de identidades a los objetos de las subclases dinámicas pertenecen al mismo marcado simbólico.

El gráfico de accesibilidad simbólico (SRG) describe la evolución de un modelo SWN a través de un conjunto de macroestados, los marcados simbólicos, que representan un conjunto de estados más detallados que son equivalentes.

El SRG corresponde a una versión agrupada del grafo de alcanzabilidad completo y esta agregación se refleja también en el nivel del proceso de Markov subyacente. Se ha demostrado que la SRG es isomorfa (presentan la misma estructura) a un proceso de Markov agregado que se puede utilizar para calcular las mismas estimaciones de rendimiento que pueden ser calculados a partir de la técnica general basado en el RG (Reachability Graph-Grafo de alcanzabilidad-), pero con un coste computacional más bajo.

### Anexo III.E Redes temporizadas

El tiempo ha sido introducido de diversas formas en las RdP. Una red de Petri temporizada es un par  $\langle R, Z \rangle$  tal que  $R = \langle P, T, \alpha, \beta \rangle$  y  $Z$  es una función que asigna un número no negativo,  $Z_i$ , a cada transición de la red:  $Z \rightarrow \mathbb{R}^+$

$z_i = Z(t_i)$  se denomina el tiempo de disparo de la transición  $t_i$ . La única cuestión a tener en cuenta es que el disparo de  $t_i$  dura  $z_i$  unidades de tiempo. El tiempo de una transición puede seguir diversas distribuciones:

- Determinista, el disparo de la transición se asocia a un valor real determinado.
- Exponencial, el disparo de la transición sigue una distribución exponencial con un valor real medio determinado. El ratio de distribución  $\lambda_i = \frac{1}{\text{valor medio}}$ .
- Distribución continua uniforme entre un rango de valores determinado
- Distribución uniforme discreta en dos valores reales determinados
- Distribución normal/Gaussiana, que viene definido por el valor medio del tiempo de disparo de la transición y la varianza
- Distribución Weibull
- Distribución triangular

En estadística la distribución exponencial es una distribución de probabilidad continua con un parámetro  $\lambda$  cuya función de densidad es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} ; \text{ para } x \geq 0$$

$$f(x) = 0 ; \text{ para } x < 0$$

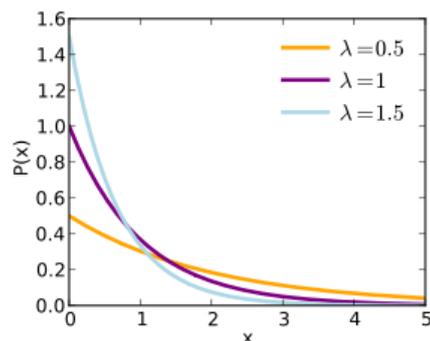


Figura 31: Función de densidad de probabilidad

Su función de distribución acumulada es:

$$F(x) = 0 ; \text{ para } x < 0$$

$$F(x) = 1 - \lambda e^{-\lambda x}; \text{ para } x \geq 0$$

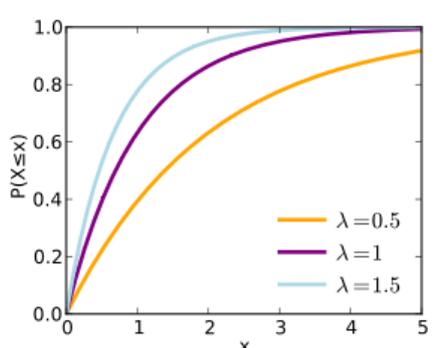


Figura 32: Función de distribución de probabilidad

El valor esperado y la varianza de una variable aleatoria X con distribución exponencial son:

$$\text{valor medio} = \frac{1}{\lambda}; \text{ varianza} = \frac{1}{\lambda^2}$$

### Anexo III.F Reglas de Transformación modelo a modelo

La especificación UML-HSS de la guía clínica es un modelo semiformal de alto nivel que es fácil de entender por las personas que toman decisiones en el hospital. Sin embargo, este modelo no puede ser directamente analizado para evaluar las propiedades cualitativas y cuantitativas usando técnicas formales, tales como evaluar el tiempo que un paciente necesita estar hospitalizado para la intervención quirúrgica en un escenario clínico en el que se presente una fractura de cadera (tratado en la sección 3.3).

Por esta razón, mediante una técnica de transformación modelo a modelo (M2M) se consigue automáticamente un modelo SWN (stochastic well formed net) desde la especificación UML-HSS. Las técnicas de transformación M2M constituyen los pilares del paradigma MDE (Model-driven engineering), donde los modelos buscados (en nuestro caso RdP) son automáticamente generados desde los modelos fuente (en nuestro caso modelos UML) por la aplicación de reglas de transformación que son definidas en las fuentes con las que trabajamos.

Las reglas de transformación se muestran en la Figura 33 y 34; la primera columna proporciona el identificador de regla y su descripción. La segunda columna describe los elementos de modelado UML-HSS del modelo objetivo y la tercera columna muestra los elementos del modelo SWN que se quiere obtener.

El modelo SWN es obtenido a través de dos pasos de transformación: primero, las reglas en la Figura 33 son aplicadas a los elementos del modelo UML-HSS de AD (diagrama de actividades) y CD (diagrama de clases), y las subredes SWN resultantes están compuestas por varios lugares con unas etiquetas comunes. Entonces, el modelo SWN compuesto se obtiene usando las reglas de la Figura 34 para considerar una adquisición/liberación de recursos y el uso/manipulación (es decir, crear, eliminar, leer o revisar) de la información sanitaria de los pacientes.

En cuanto al primer paso (Figura 33), las reglas R1-R5 son aplicadas a los elementos del modelo que pertenecen al diagrama de actividades, mientras que las reglas R6-R7 son aplicadas a las clases del diagrama de clases.

La regla R1 representa la transformación del nodo inicial “solicitud de tratamiento” del diagrama de actividades en un simple lugar del modelo SWN con una etiqueta  $i$ , que es un identificador del arco de actividad que deja el nodo inicial. Un campo de color  $P$  y un marcado inicial son también establecidos en el lugar inicial de la SWN, según los valores etiquetados en  $nPatients$ . En particular,  $P$  es una clase de color formada por una única clase de color estático  $Patients$ , que incluyen  $N$  diferentes colores  $p_1, \dots, p_n$  (cada color corresponde a un paciente identificado) y el marcado inicial  $nP$  corresponde a un conjunto de  $N$  símbolos, uno por cada color  $p_i$ .

La regla R2 transforma una acción del nodo tarea  $A$  en una subred del modelo SWN que consiste en una transición temporizada, la cual dispone de un lugar de entrada y salida; los arcos de entrada y salida son etiquetados con identificadores de la tarea  $A$ . Se establece como tiempo de disparo de la transición en el modelo SWN la inversa de la duración media asociada a la tarea  $A$ . La expresión asignada a los arcos de entrada y salida de la transición que representa a la tarea  $A$  corresponde a la función de proyección  $(x)$ , entonces, el disparo de la transición del modelo SWN borra la marca coloreada desde el lugar de entrada y añade una al lugar de salida.

La regla R3 transforma un nodo de decisión a un par de transiciones inmediatas en conflicto. La regla representa una elección probabilística y los valores de las probabilidades asociadas a los arcos de salida del nodo de decisión, son usados para fijar los pesos de las transiciones inmediatas en el modelo SWN.

La regla R4 transforma un nodo unión a una subred del modelo SWN que unifica flujos alternativos: en particular, los lugares de la subred son etiquetados con los identificadores de los arcos de actividad de entrada y salida.

La regla R5 es aplicada los nodos finales de un diagrama de actividades: cada nodo final se representa como una transición inmediata del modelo SWN con un lugar de entrada y salida. El lugar de entrada se etiqueta con el identificador del arco de actividad entrante al nodo final, mientras el lugar de salida se etiqueta con el identificador del arco de actividad que deja el nodo inicial. Ejemplificando en los modelos trabajados el lugar de entrada pertenece a un dominio en el que se encuentran los pacientes y el recurso utilizado, una vez realizada la actividad final el arco de salida hacia el lugar final está etiquetado solo con pacientes. Todos los lugares SWN producidos por las reglas R1-R5 tienen un conjunto de pacientes como dominio de color.

La regla R6 convierte una clase `<<ResourceType -TipodeRecurso->>` estereotipada en un simple lugar del modelo SWN: el nombre del lugar se asocia al nombre de la clase (por ejemplo si el recurso utilizado son los doctores el nombre del lugar será doctor) y la etiqueta del lugar se asigna al identificador del recurso ( $d$ ). El valor de la etiqueta  $nResources$  se utiliza para definir el dominio de color  $D$  y el marcado  $nD$  del lugar, donde  $D$  es la clase de color que consiste en una clase única de color estática  $Doctor$ , que incluye 3 colores diferentes  $D_1 \dots D_3$  (cada color corresponde a un identificador de cada doctor) y el marcado inicial  $nD$  corresponde a un conjunto de tres señales coloreadas, uno por cada color  $d_i$ .

Por último, la regla R7 es similar a R1, pero aplicada a representar el tipo de información sobre la salud de los pacientes, que es cuando una clase está estereotipada como `HealthInfo` (información sanitaria).

La aplicación de las reglas R1-R5 sobre el modelo UML-HSS genera un modelo SWN que representa el flujo de control de los pacientes según la guía clínica modelada a través de un

diagrama de actividades. Además, el modelo SWN incluye lugares aislados (derivados de reglas R6-R7) que representan los recursos del hospital y la información sanitaria de los pacientes.

Las reglas R1-R5 crean elementos del modelo SWN ya interconectados, las reglas R8-R13 introducen en el diagrama de actividad el uso de los recursos y tratamiento de información médica.

La regla R8 considera el arco de actividad del diagrama de actividades que conecta nodos de acción y de control (es decir, nodo inicial, nodo de decisión, nodo de unión, nodo final), y especifica la asignación (<<ResourceUsageStep>>, acquire y acqUnits, etiqueta de los recursos utilizados en la que se indica los recursos a utilizar y la cantidad) del recurso(s) del hospital. En tal caso, cada tipo de recurso asignado se asocia a una transición inmediata que sustrae desde el lugar de recursos correspondiente tantas señales como se especifiquen en la etiqueta (acqUnits). En la Figura 34, la transición SWN "acqBed" sustrae una cama del lugar de recursos "cama" (arco expresión <b>) y la transición SWN "AcqNurse" sustrae dos enfermeras del lugar de recurso "enfermera" (arco expresión <n1> + <n2>) de acuerdo con el valor etiquetado "acqUnits".

La regla R9 es la complementaria a la regla R8 y considera la liberación de recursos ((<<ResourceUsageStep>>, release y relUnits; dicha etiqueta indica el tipo y número de recursos que han dejado de usarse).

Las reglas R10-R13 muestran las diferentes operaciones en cuanto al manejo de la información sanitaria de los pacientes.

Las normas R10 y R11 -Crear y quitar operaciones- son similares a la regla de asignación/retiro especificadas en las reglas R8 y R9 respectivamente.

La operación de lectura, regla del R12, se modelada como una transición con un arco de prueba (es decir, arco de entrada-salida) en el lugar que presenta la información.

Por último, la operación de verificación -regla del R13- especifica una condición booleana (por ejemplo, si el paciente está incluido en la lista del programa de auto-transfusión o no) y se representa como una pareja de transiciones con una elección en conflicto. Ambas transiciones están conectados al lugar que representa información de sanitaria de los pacientes: una transición modela el verdadero valor de la condición y está conectado con un arco de prueba, la otra transición modela el falso valor y está conectado con un arco inhibidor.

Rule	UML-HSS model element (source)	SWN model element (target)
[R1] Analysis context parameters and treatment request (quantity)		<p>guideline start</p> <p><math>i \text{ (nP) } P</math></p> <p><u>Color definition:</u>  <math>P = u \text{ Patients}</math>  <math>\text{Patients} = p(1-N)</math>  <u>Marking definition:</u>  <math>nP = \langle S \rangle</math></p>
[R2] Task (duration)		
[R3] Alternative choice (probability)		
[R4] Branch merging		
[R5] Final node		
[R6] Hospital resource (type and quantity)		<p>Doctor</p> <p><math>d \text{ (nD) } D</math></p> <p><u>Color definition:</u>  <math>D = u \text{ Doctor}</math>  <math>\text{Doctor} = d(1-3)</math>  <u>Marking definition:</u>  <math>nD = \langle S \rangle</math></p>
[R7] Patients' health information (type and quantity)		<p>AutoTransfusion</p> <p><math>a \text{ (nA) } P</math></p> <p><u>Marking definition:</u>  <math>nA = \langle p1 \rangle + \dots + \langle pM \rangle</math></p>

Figura 34: Tabla I reglas de transformación

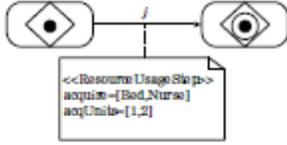
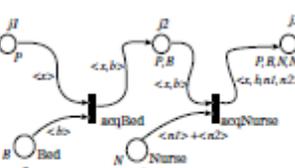
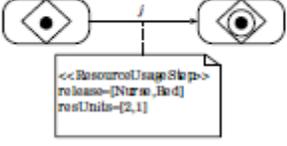
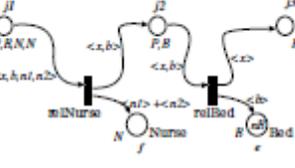
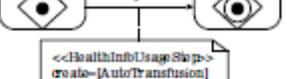
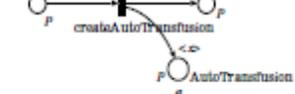
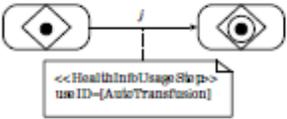
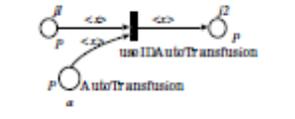
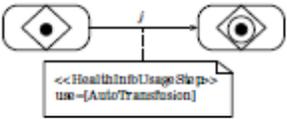
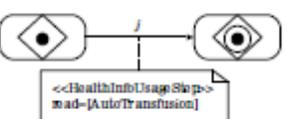
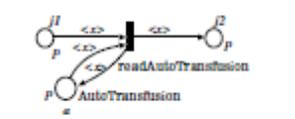
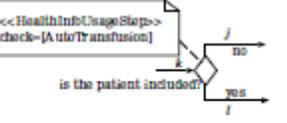
Rule	UML-ISS model element (source)	SWN model element (target)
[R8] Use of resources (allocation)		
[R9] Use of resources (de-allocation)		
[R10] Manipulation of patients' healths information (create)		
[R11a] Use of patients' healths information (useID)		
[R11b] Use of patients' healths information (use)		
[R12] Use of patients' healths information (read)		
[R13] Use of patients' healths information (check)		

Figura 35: Tabla II reglas de transformación