



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Arquitectura con Orientación a Servicios para la Teleoperación de Máquinas de
Rehabilitación de la Articulación de Rodilla

Iván Darío Ruiz Hidalgo

Director

José Isidro Gracia, Ph.D.

Escuela de Ingeniería Mecánica

Santiago de Cali

Noviembre de 2015



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Arquitectura con Orientación a Servicios para la Teleoperación de Máquinas de
Rehabilitación de la Articulación de Rodilla

Iván Darío Ruiz Hidalgo

Director

José Isidro Gracia, Ph.D.

Proyecto de investigación para optar por el título de
Magister en Ingeniería énfasis en Mecánica

Escuela de Ingeniería Mecánica

Santiago de Cali

Noviembre de 2015

RESUMEN

En Colombia, al igual que en varios países en vía de desarrollo, tales como Brasil, México, entre otros, el servicio de salud presenta varias posibilidades de mejora, en cobertura, accesibilidad y calidad del servicio. Por ejemplo en Colombia, considerando la falta de recursos en los centros de salud localizados en las zonas rurales, una parte de la población colombiana ve afectada la calidad del servicio de salud que reciben. Si a esto se suma el bajo nivel socio-económico de algunas poblaciones rurales, se genera una condición de vulnerabilidad geográfica para esta población. Por tal motivo, en este trabajo se presenta una arquitectura orientada a servicios con el objetivo de apoyar a los centros de salud con bajos recursos tanto técnicos como humanos, que permitan una atención de rehabilitación física independiente de la localización tanto del paciente como del profesional de la salud. Como caso de estudio, se incursionará en el área de la fisioterapia y más específicamente en máquinas de movimiento pasivo para la articulación de rodilla. De esta manera, se propone un sistema distribuido utilizando un medio de comunicación disperso, como internet, y para asegurar tanto la definición de los servicios de teleoperación del dispositivo asistente como de la integración y coordinación de los mismos se realiza un procedimiento de modelado basado en una herramienta formal como lo es las Redes de Petri.

Palabras clave: Telemedicina, Teleoperación, Redes de Petri, Arquitectura orientada a servicios, SOA, Maquina de Movimiento Pasivo.

ABSTRACT

In Colombia, as in many developing countries, such as Brazil, Mexico, and others, the health service has several possible improvements in coverage, accessibility and quality of service. For example in Colombia, considering the lack of resources in health centers located in rural areas, part of the Colombian population affected the quality of health care they receive. In addition, low socioeconomic status of some rural populations obtained as a result a vulnerable population in terms of its isolation from major cities. Therefore, in this work is presents a service oriented architecture in order to support health centers with low both technical and human resources that enable care physical rehabilitation independent of the location of both the patient and the professional health. As a case of study, this project will join in physiotherapy area and more specifically in passive motion machines for the knee joint. The objective is to achieve that a specialist medical can attend and perform a process of physical therapy to a patient, geographically distant, with a knee temporary disability. Thus, the Internet network is used as a communication channel and a modeling in a formal tool like Petri nets is proposed, to define both the services of teleoperation of the wizard device and the integration and coordination of the same.

Keywords: Telemedicine, Teleoperation, Petri nets, Service Oriented Architecture, SOA, Passive Motion Machine.

Tabla de Contenido

Introducción	9
Planteamiento del problema.....	11
Justificación	12
Objetivos	14
Objetivo General	14
Objetivos específicos	14
Organización del documento.....	15
Capítulo 1. Marco teórico y Conceptos fundamentales	16
1.1. Sistemas distribuidos	16
1.1.1. Comunicación síncrona y asíncrona	16
1.2. Definición arquitectura SOA.....	17
1.2.1. <i>Web Services</i>	18
1.2.2. <i>Web Service</i> (WS) y SOA.....	20
1.2.3. SOAP (Simple Object Access Protocol).....	20
1.2.4. Mensaje en SOAP	22
1.3. Contextualización del problema	23
1.3.1. Teleoperación, Telemedicina y telesalud.....	23
1.3.2. ¿Qué es discapacidad?.....	24
1.3.3. ¿Qué es rehabilitación?.....	25
1.3.4. Vulnerabilidad geográfica	25
Resumen del capítulo	26
Capítulo 2. Estado del arte y metodología propuesta	27
2.1. Metodología propuesta.....	27

2.2. Telemedicina en Colombia.....	28
2.3. Telemedicina en el mundo	29
2.4. Herramienta de modelado.....	34
2.4.1. Redes de Petri	34
2.4.2. Redes de Petri Coloreadas	36
Resumen del capitulo	37
Capítulo 3. Definición de la arquitectura.....	38
3.1. Conceptualización del problema y definición de servicios	38
3.1.1. Definición de los servicios y actores del sistema.....	40
3.2. Arquitectura general del sistema.....	41
Resumen del capitulo	43
Capítulo 4. Ejemplo Aplicación, modelado del sistema e implementación	44
4.1. Conceptualización del problema.....	44
4.2. Definición de la arquitectura para caso de estudio.....	47
4.3. Modelamiento del sistema en Redes de Petri Coloreadas	50
4.4. Implementación	55
4.4.1. Interfaz de usuario para médico especialista.....	55
4.4.2. Interfaz de usuario para coequipero.....	59
Resumen del capitulo	61
Capítulo 5. Resultados, conclusiones y trabajos futuros	62
5.1. Resultados.....	62
5.2. Escenarios de validación.....	63
5.2.1. Funcionamiento correcto del sistema	63
5.2.2. Falla en la comunicación del sistema	65

5.3. Conclusiones	67
5.4. Recomendaciones y trabajos futuros.....	68
Bibliografía.....	70

Lista de Figuras

Figura 1 - Deficiencias y discapacidades en Colombia.....	13
Figura 2 – Estructura básica de un WS.....	18
Figura 3 – Elementos principales de un WS	19
Figura 4 – Protocolos involucrados en un WS	20
Figura 5 – Servicio de medir temperatura. Ejemplo SOAP	22
Figura 6 – Componentes de un mensaje en SOAP	22
Figura 7 – Metodología implementada	27
Figura 7 – Condición de disparo	35
Figura 8 – Espacio de trabajo cpntools	36
Figura 10 - Sistema cliente-servidor con orientación a servicios	39
Figura 11 - Sistema cliente-servidor para máquina de rodilla.....	39
Figura 12 - Funcionamiento general del sistema	40
Figura 13 – Arquitectura general del sistema.....	42
Figura 14 – operaciones generales Servicio Teleoperación	42
Figura 15 - operaciones generales Servicio Hospital Aislado.....	43
Figura 16 - Flexión y extensión de una rodilla.....	44
Figura 17 - Máquina de rehabilitación de rodilla.....	45
Figura 18 - Control local de la máquina de rehabilitación de rodilla	45
Figura 19 - Disposición de los elementos de control en la máquina de rodilla.....	46
Figura 20 – Fotografía maquina construida.....	47
Figura 21 – Arquitectura del ejemplo de aplicación	48
Figura 22 – Red general	50
Figura 23 – Operaciones principales servicio de teleoperación	51
Figura 24 – Operaciones principales servicio hospital aislado	52
Figura 25 – Servicio de máquina de rodilla	53
Figura 26 – Observador de comunicación.....	53

Figura 27 – Resumen conexiones entre servicios	54
Figura 28 – Interfaz general para el médico especialista.....	56
Figura 29 – Etapa de control de la interfaz médico.....	56
Figura 30 – Manejo base de datos de interfaz médico	58
Figura 31 – Comparación servicio de teleoperación modelo vs implementación.....	58
Figura 32 – Interfaz general coequipero.....	59
Figura 33 - Comparación servicio de hospital aislado modelo vs implementación	60
Figura 34 – Maquina con pesos calibrados.....	63
Figura 35 – Corriente vs tiempo maquina sin peso.....	64
Figura 36 – Corriente vs tiempo maquina con peso equivalente a pierna de persona 80kg ..	65
Figura 37 – Informe estado desconectado interfaz medico	66
Figura 38 – Informe de estado desconectado interfaz coequipero.....	67

Lista de Tablas

Tabla 1 – Resumen Antecedentes telemedicina.....	33
Tabla 2 – Requerimientos de diseño de la máquina de rodilla	44
Tabla 3 – Ejemplo fase de rehabilitación.....	49
Tabla 4 – Ejemplo Protocolo de rehabilitación	49
Tabla 5 – Comparación del modelado e implementación contra características de SOA	63
Tabla 6 – Terapia estándar seleccionada	64

Introducción

En Colombia, al igual que varios países latinoamericanos, el sistema de salud evidencia una situación crítica en temas relacionados con cobertura, accesibilidad, calidad, entre otros [1]. Eso, sumado a la inconformidad de la sociedad que juzga de forma severa la ineficiencia, las demoras y las barreras de acceso al sistema y cuestiona permanentemente la calidad, la agilidad de la atención y los costos de la tecnología [1]. Donde, una acertada solución a estos inconvenientes es compleja en función de la heterogeneidad de los recursos que integran el sistema de salud y los costos asociados. Adicionalmente, otros aspectos que contribuyen a acrecentar los problemas de salud están relacionados con la distribución poco equitativa de los ingresos, sumados a los frecuentes desplazamientos por la violencia hacen que la infraestructura del servicio de salud presente serias dificultades en cuanto a cobertura y calidad [1].

Adicionalmente, considerando que la distribución de profesionales en la mayoría de los países en vía de desarrollo está concentrada en los grandes núcleos urbanos, se disminuye las posibilidades de la atención médica especializada en zonas rurales, pueblos, ciudades pequeñas e incluso capitales con mediana población [2].

Igualmente, existe una población altamente vulnerable en función del aislamiento de sus regiones de los centros de desarrollo, debido a que son poblaciones con bajo nivel socioeconómico que tienen acceso a una infraestructura hospitalaria con limitados servicios de salud especializados y una inadecuada estructura vial. Esta es la realidad que se vive en departamentos como Chocó, Amazonas, Vaupés y Guainía. De esta forma, el gobierno no puede asegurar adecuadamente el derecho fundamental de la salud en todo el territorio nacional, siendo factible mediante la telesalud la ampliación de cobertura [3].

Desde este punto de vista, y tratando de resolver los problemas de cobertura en salud que presenta Colombia, se ha comenzado a implementar soluciones de telesalud [4], la cual define estrategias que permiten la ampliación de cobertura en salud mediante el uso de herramientas informáticas, electrónicas y de telecomunicaciones. Esta sinergia entre tecnología de comunicaciones y salud permite un aumento en los diagnósticos tempranos y tratamientos efectivos de las enfermedades [4]. Esto permite a las comunidades alejadas y con bajo nivel socio-económico del territorio nacional acceder a los servicios de medicina especializada sin tener que desplazarse a ciudades principales [5].

Este escenario, que viabiliza que un profesional de la salud pueda atender oportunamente a pacientes en una dispersa localización geográfica, ofrece entre otras ventajas: descentralización de los centros de rehabilitación, aumento de cobertura y la prevención de contagio. Basado en lo presentado anteriormente, se puede afirmar que la telemedicina es una forma efectiva en la cual el Estado Colombiano puede asegurar a sus ciudadanos el derecho a la salud [4].

Esta estrategia ha sido utilizada exitosamente en otros países emergentes como Brasil, algunos países africanos [6] [7] y en general países en vía de desarrollo. Por ejemplo, en Brasil, existe el programa de Atención primaria de salud que favorece a 11 estados en los cuales son atendidos mediante telemedicina cerca de 1100 municipios [8].

Por otro lado, en países como Mongolia se ha realizado telemedicina enfocada al cuidado y control neonatal en regiones rurales de dicho país. En total se trataron 598 pacientes entre el 2007 y el 2009 de los cuales solo 36 fueron remitidos a un centro de salud de una ciudad principal [6]. Esto demuestra que la telemedicina es una herramienta efectiva para evitar los desplazamientos a los centros de salud lo que podría poner en riesgo la integridad y salud del paciente.

Este proyecto está enfocado al desarrollo y avance en telemedicina con el objetivo de ampliar cobertura, lo que permitiría un fortalecimiento en la infraestructura de salud. La idea, es apoyar a los centros de salud de regiones aislados del país, por medio de centros de salud localizados en los centros urbanos, los cuales cuentan con mayor personal altamente capacitado. Esto se logrará creando una arquitectura que permita la interacción vía internet entre un paciente y un médico especialista, los cuales se encuentran geográficamente distantes.

Dentro de la telemedicina, se va a trabajar en el área de fisioterapia y más específicamente en la articulación de rodilla. De esta forma, se define una arquitectura orientada a servicios con el objetivo de lograr un ambiente disperso geográfico de pacientes y profesionales de la salud altamente capacitados en rehabilitación física para articulación de rodilla.

Considerando las graves consecuencias de una inadecuada especificación del sistema, se propone un procedimiento de modelado basado en una herramienta formal, como lo es la Red de Petri, para la definición tanto del servicio de teleoperación del dispositivo asistente como de la integración y coordinación de los mismos. Para esto, se considera la dinámica

del sistema orientada por la ocurrencia de eventos (SED). Finalmente, con el objetivo de valoración de la propuesta del proyecto, es considerado la implementación de un ejemplo de aplicación práctico que en este caso será una máquina de movimiento pasivo, de rehabilitación para articulación de rodilla.

Planteamiento del problema

Basado en lo expuesto anteriormente, este proyecto afronta la siguiente problemática general:

¿Cómo en un ambiente geográficamente aislado, una persona en condición de discapacidad transitoria que necesita de una rehabilitación de rodilla, logra mejorar su bienestar venciendo las barreras de accesibilidad en el sistema de salud actual mediante la ampliación de cobertura?

Específicamente, este proyecto se presenta como una contribución inicial a la solución de la problemática presentada. De esta forma, aquí se aborda la problemática de determinación de la viabilidad tecnológica de la arquitectura con orientación a servicios en aplicaciones de rehabilitación de rodilla.

Justificación

En Colombia, hay zonas geográficamente asiladas (ZGA) como resultado de una inadecuada infraestructura vial. Esto sumado a que el servicio de salud está centralizado en las grandes ciudades, da como resultado una prestación deficiente del servicio de salud en las ZGA. En este contexto, la incorporación de avances de tecnología de la información presenta una contribución a la solución de estos inconvenientes [3].

Por otra parte, en Colombia, el número de profesionales de la salud está por debajo de lo necesario para satisfacer la demanda de la creciente población [2]. Adicionalmente, en varias regiones apartadas del territorio nacional, los centros hospitalarios, en varias especialidades de la medicina, carecen de diferentes recursos tanto técnicos como humanos altamente especializados que ofrezcan una atención primaria y oportuna a la población circundante. Esto implica que los habitantes de las ZGA, frecuentemente, se vean en la necesidad de desplazarse hasta el centro hospitalario de cualquier ciudad principal para recibir atención médica especializada. Sin embargo, por ejemplo, en departamentos colombianos como Choco, Amazonas, Vaupés y Guainía, entre otros, presentan una infraestructura vial con varias posibilidades de mejora para poderla considerar funcional, ocasionando que este desplazamiento pueda comprometer el tratamiento, la recuperación y hasta la vida del paciente [2]. De acuerdo a esto, es recomendable el desarrollo de una arquitectura que permita a profesionales de la salud y pacientes una interacción dinámica, para ofrecer un tratamiento a los pacientes independientemente de la ubicación geográfica.

En este contexto, según [9], en Colombia toda la salud y en particular el área de la fisioterapia presentan un bajo índice de calidad de atención relacionada con la demanda. Esto se origina en el hecho que una aplicación de un protocolo de rehabilitación por fisioterapia exige varias sesiones, lo cual implica un uso repetitivo de recursos tanto técnicos como humanos. Considerando que una limitada trazabilidad en los protocolos impida una eficaz aplicación, los centros de rehabilitación normalmente se encuentran en su capacidad máxima de atención que impide una satisfactoria demanda de nuevos pacientes.

Según el último CENSO realizado en Colombia en el año 2005 se estimó que por cada 100 colombianos 29,3 tienen limitaciones permanentes para caminar o moverse. Además por cada 100 colombianos 14,7 tienen limitaciones permanentes para usar brazos y manos. En general, 2'632.255 de personas en Colombia tienen al menos una discapacidad o limitación [10]. Como se puede ver Figura 1, dentro del grupo de personas con discapacidades, la

mayoría sufren problemas asociados con el movimiento del cuerpo. Basado en lo anteriormente expuesto, en este proyecto se escogió incursionar en telemedicina aplicada en fisioterapia.

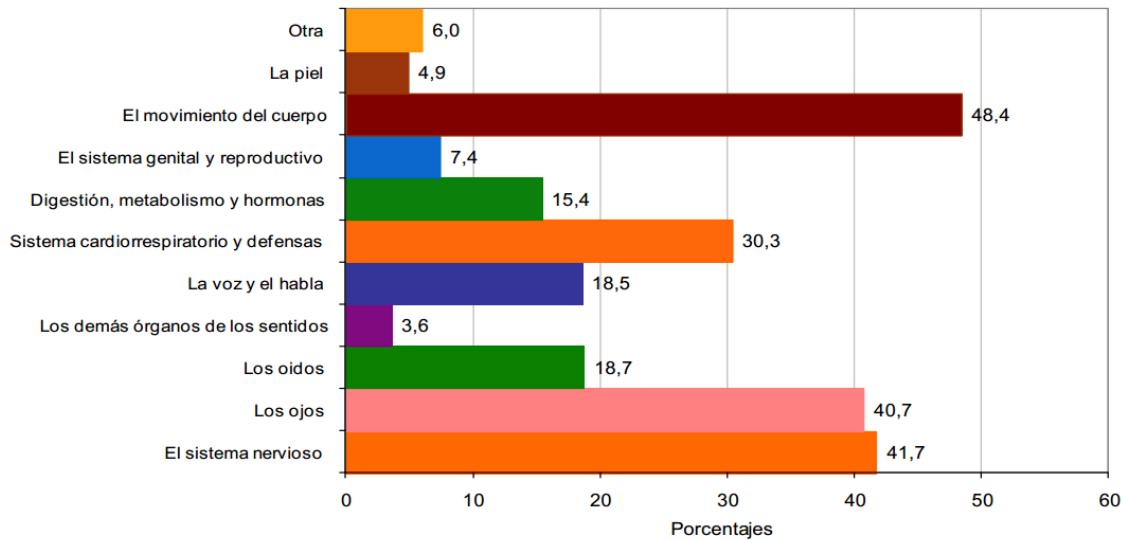


Figura 1 - Deficiencias y discapacidades en Colombia
Fuente: [11]

Este problema de deficiencia en la prestación del servicio de fisioterapia en Colombia, es relevante en regiones aisladas geográficamente, donde probablemente muchas personas sufren de limitaciones para caminar o moverse como resultado de un acceso limitado al servicio de salud.

Además, desde el punto de vista legal, la constitución Colombiana, protege los derechos de las personas con discapacidades como lo evidencia la ley 1346 del año 2009, la cual estipula los derechos de personas con movilidad reducida [12].

El presente trabajo trata de ampliar cobertura en el área de fisioterapia prestando el servicio de rehabilitación, más específicamente tratando una lesión de rodilla. Todas las articulaciones del cuerpo humano son importantes, sin embargo, la rodilla tiene una especial importancia porque compromete directamente las actividades de la vida diaria (caminar, correr, practicar algún deporte), las actividades de autocuidado (bañarse y realizar las necesidades fisiológicas del cuerpo) y actividades laborales. Cuando no se pueden realizar dichas actividades, se compromete directamente la calidad de vida de la persona.

De acuerdo con la dotación y capacidad para atender a sus pacientes, todos los hospitales en Colombia se dividen en tres niveles diferentes [13]:

- *Primer nivel:* A este nivel pertenecen los hospitales locales donde se brinda una atención básica. Solo cuentan con médicos generales para la atención de consultas y no hacen procedimientos quirúrgicos [13] [14].
- *Segundo nivel:* Son llamados hospitales regionales y están mejor dotados que los hospitales de primer nivel. Tienen mínimo cuatro especialistas: anestesiólogo, cirujano, ginecólogo y de medicina interna. Además, cuentan con laboratorio médico con capacidad para practicar los exámenes básicos de sangre, orina y materia fecal [13] [14].
- *Tercer nivel:* Son llamados hospitales de referencia o altamente especializados donde los pacientes remitidos de los hospitales regionales. Estos hospitales tienen gran número de especialistas: cardiólogos, dermatólogos, siquiátras, neurólogos, entre otros [13] [14].

Objetivos

Objetivo General

Plantear una arquitectura con orientación a servicios para la teleoperación de máquinas de rehabilitación para la articulación de rodilla.

Objetivos específicos

- Definir los diferentes servicios que permitan la teleoperación de máquinas de rehabilitación para la articulación de rodilla.
- Especificar los sistemas de comunicación y coordinación de los diferentes elementos que componen la arquitectura definida.
- Implementar la arquitectura del sistema de rehabilitación de rodilla con orientación a servicios
- Validar las especificaciones técnicas de la arquitectura mediante pruebas experimentales.

Organización del documento

El presente trabajo, se dividirá en cinco capítulos que se describirán brevemente a continuación:

- En el primer capítulo se presenta una visión general de los conceptos básicos utilizados a lo largo del documento. Se dan las características principales de una arquitectura orientada a servicios así como también definiciones básicas de telemedicina y teleoperación.
- Luego, en el capítulo dos se muestran diferentes trabajos que se han realizado en telemedicina. Aquí, también se muestra brevemente la herramienta de modelado utilizada (Redes de Petri) y la interfaz utilizada para realizar el modelado de la arquitectura.
- Posteriormente, en el capítulo tres, se presenta la definición de la arquitectura así como la definición de los servicios y la forma en que estos servicios se relacionan para formar la arquitectura.
- En el capítulo cuatro, se adapta la arquitectura propuesta en el capítulo anterior a un ejemplo de aplicación. Se presenta el modelo de la arquitectura en Redes de Petri Coloreadas y se realiza la implementación del modelado utilizando *web service*.
- Por último, en el capítulo cinco se generan las conclusiones y recomendaciones realizadas a partir de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores. Se proponen algunos escenarios de validación para comparar el modelo en Redes de Petri contra la implementación realizada. Además se discuten los posibles trabajos futuros.

Capítulo 1. Marco teórico y Conceptos fundamentales

En este capítulo, se presentarán las herramientas teóricas que se van a utilizar a lo largo del proyecto. Todo esto con la finalidad de hacer claridad en los temas que se abordarán para la culminación de este trabajo.

1.1. Sistemas distribuidos

El concepto de sistema distribuido (SD) se opone al del sistema centralizado (SC), en el cual se construye un único componente que da servicio a todos los clientes. El clásico SC consiste en un computador servidor que ejecuta las aplicaciones que los usuarios solicitan. Por su parte, los SD son un nivel de organización complejo de una arquitectura. Es cuando un conjunto de computadores independientes se interconectan entre si y cooperan para ofrecer un servicio en conjunto [15].

En general, hay ciertas características de un SD que permiten esclarecer sus ventajas frente a un SC. Por su parte un SD es fácilmente escalable siempre que gestionen adecuadamente los recursos. Además, actualmente muchas aplicaciones son por naturaleza distribuidas (por ejemplo: correo electrónico, telefonía móvil, cajeros electrónicos, etc.) [15].

1.1.1. Comunicación síncrona y asíncrona

Algo importante por destacar dentro de los SD es el tipo de comunicación que se hace entre dispositivos. Una clasificación es la comunicación síncrona y asíncrona. La comunicación síncrona, generalmente se entiende como una comunicación que necesita que los participantes de la misma coincidan en el tiempo. Un ejemplo de este tipo de comunicación podría ser una comunicación por radio (por ejemplo los *Walkie Talkies*), en el cual los dos involucrados en la conversación están altamente ligados a las respuestas de la otra persona [16].

Por otro lado, la comunicación asíncrona es independiente del tiempo, esto significa que para llevar a cabo la comunicación no es necesario que los participantes coincidan en el mismo tiempo. Un ejemplo claro de este tipo de comunicación son los emails, los cuales por su naturaleza, no son leídos comúnmente al mismo instante en que son enviados [16].

1.2. Definición arquitectura SOA

Una Arquitectura SOA (llamado así por sus siglas en inglés *Service Oriented Architecture* y en español Arquitectura con Orientación a Servicios) establece un marco de diseño la integración de las aplicaciones independientes de manera que desde la red pueda accederse a sus funcionalidades, las cuales se ofrecen como servicios. La forma más habitual de implementarla es mediante servicios web [17].

No existe una definición estándar de SOA, por lo tanto, lo único que se puede proporcionar es un conjunto de Principios que estén muy asociados con la Orientación a Servicios. Según [18], algunos de estos principios son:

- **Los Servicios deben ser reusables:** Evitando la redundancia, la reusabilidad en general es un objetivo importante en el desarrollo de software. Cualquier sistema desarrollado bajo los principios de SOA suele recurrir al llamado del mismo servicio para su funcionamiento. La reutilización dentro de la misma aplicación o incluso en otras aplicaciones llega a tener mucha importancia, sin embargo muchas veces llega a ser un objetivo pero no una regla [18].
- **Los servicios deben ser interoperables:** una alta interoperabilidad es un requisito básico de la arquitectura SOA. En este sentido, los servicios se pueden llamar desde cualquier otro sistema, que son intrínsecamente interoperables. Esto es más una propiedad de SOA que un atributo de los servicios [18].
- **Los Servicios deben permitir la composición:** en general los servicios pueden usar o llamar otros servicios. En general, cuando la funcionalidad de un servicio se torna complejo, se puede descomponer en varios servicios que se comunican entre sí y componen un servicio más amplio [18].
- **Los Servicios deben de ser auto-contenido:** Toda definición de SOA está de acuerdo en que el servicio debe ser autónomo e independiente. En general, algunas dependencias siempre existen pero el objetivo es reducir las dependencias al máximo para ayudar a garantizar la reusabilidad del servicio [18].
- **Los Servicios deben tener bajo acoplamiento:** Este bajo acoplamiento se logra como resultado de la independencia de los servicios. Este concepto es utilizado habitualmente para minimizar las dependencias entre servicios. Cuando hay menos

dependencias, modificaciones o fallos en un sistema tendrá menos consecuencias sobre otros sistemas [18].

- **Los Servicios no deben tener estado:** Conceptualmente, un servicio no debe tener ni guardar ningún estado entre los diferentes llamados que se pueden producir al mismo servicio. En otras palabras, después de que el llamado del servicio se ha terminado, todas las variables locales y objetos creados temporalmente para correr el servicio son desechados [18].
- **Los Servicios deben poder ser descubiertos:** Para llamar un servicio es necesario saber que el servicio existe. En el caso de los Servicios Web, se debe centralizar los servicios dentro de un registro común en registros UDDI (*Universal Description, Discovery and Integration*) [18].

Desde este punto de vista, la estrategia de orientación a servicios permite la creación de servicios y aplicaciones compuestas que pueden existir con independencia de las tecnologías subyacentes. En lugar de exigir que todos los datos y la lógica este en un mismo ordenador, el modelo de orientación a servicios facilita el acceso y el consumo de recursos a través de la red [17].

1.2.1. Web Services

Un *Web Service* (WS) es un servicio que está disponible en internet o intranet. Utiliza un lenguaje estandarizado como XML (*Extensible Markup Language*) por lo cual no está atado a ningún lenguaje de programación ni a ningún sistema operativo [19].

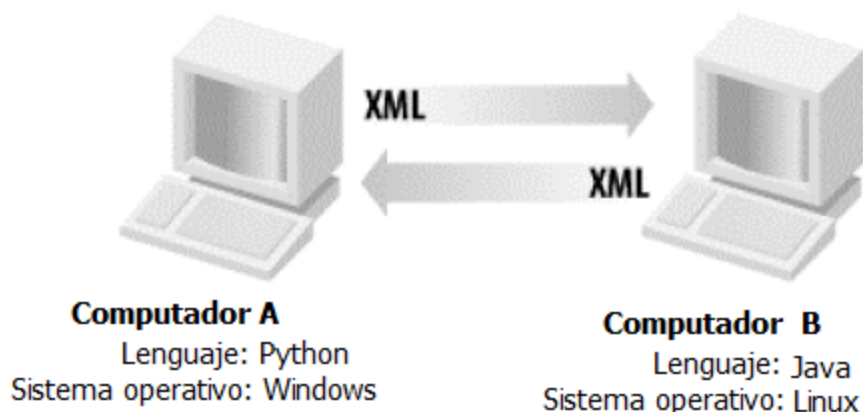


Figura 2 – Estructura básica de un WS
Adaptado de [19]

Características principales de un WS [19]:

- Está disponible en internet o en una red privada
- Usa XML para estructurar los datos implementados
- No está atado a ningún sistema operativo ni a ningún lenguaje de programación
- Es legible, es decir que se entiende fácilmente. Esto ayuda a que otros desarrolladores puedan entender cualquier servicio de tal manera que puedan integrarlo a múltiples aplicaciones
- No solo basta con que el servicio esté disponible, debe ser fácil de encontrar y de acceder a dicho servicio

Para una correcta prestación de un WS, se necesitan los siguientes elementos (ver Figura 3):

- **Proveedor del servicio:** Es quien proporciona el servicio y hace que esté disponible
- **Solicitante del servicio:** Es quien requiere y consume el servicio. Utiliza XML para realizar la solicitud
- **Registro del servicio:** Es un directorio centralizado de servicios. Esto proporciona un lugar central donde los desarrolladores pueden publicar nuevos servicios y buscar existentes.

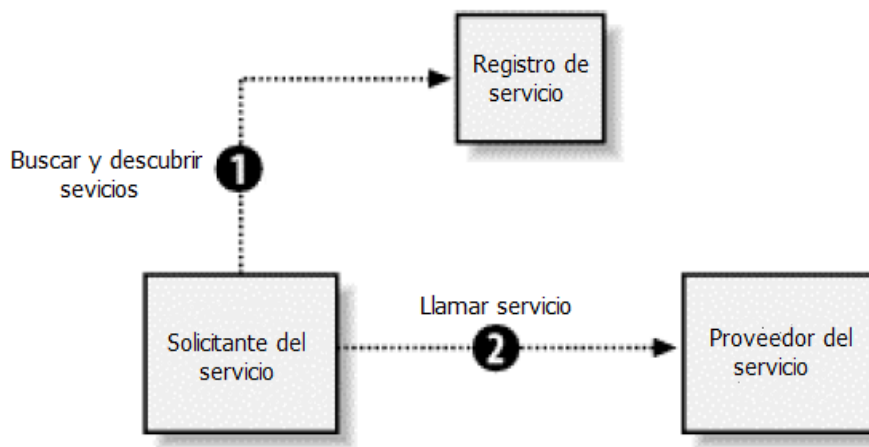


Figura 3 – Elementos principales de un WS
Adaptado de [19]

Los WS están compuestos por cuatro capas:

- *Servicio de transporte*: Esta capa es la responsable de transportar mensajes e información entre aplicaciones. Incluye protocolos como HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*), FTP (*File Transfer Protocol*) y BEEP (*Blocks Extensible Exchange Protocol*) [19].
- *Servicio de mensajes*: Esta capa es responsable de codificar los mensajes en un lenguaje estandarizado como XML de tal manera que sea legible. Esta capa incluye XML-RPC y SOAP [19].
- *Servicio de descripción*: Esta es la capa responsable de describir una interface pública de un determinado WS. Está atado a WSDL (*Web Service Description Language*) [19].
- *Servicio de descubrimiento*: Esta capa es la responsable de centralizar los servicios dentro de un registro común. Esto proporciona una forma fácil de publicar, buscar y encontrar diferentes servicios. Está atado a UDDI (*Universal Description, Discovery and Integration*) [19].

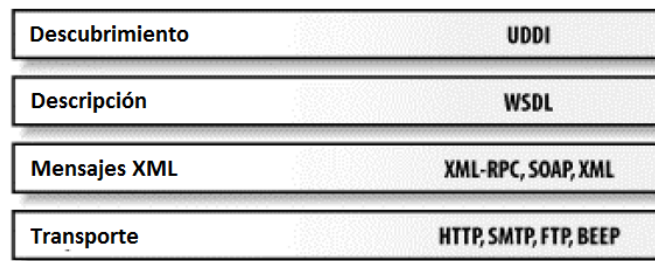


Figura 4 – Protocolos involucrados en un WS
Adaptado de [19]

1.2.2. Web Service (WS) y SOA

Una solución de diseño basada en SOA no necesariamente exige implementar *Web Service*. No obstante, es la forma más habitual de implementarlo. Los WS se basan en un conjunto de estándares de comunicación, como XML para la representación de los datos, SOAP (*Simple Object Access Protocol*) para el intercambio de datos y el lenguaje WSDL (*Web Services Description Language*) para describir las funcionalidades de un servicio [19].

1.2.3. SOAP (Simple Object Access Protocol)

SOAP es un protocolo de intercambio de información entre computadores basado en XML. Aunque SOAP puede ser usado en una variedad de sistemas que involucran intercambio de

información y puede ser entregado utilizando una gran variedad de protocolos de transporte, SOAP se enfoca en HTTP como protocolo de transporte de información. SOAP permite a las aplicaciones del cliente conectarse de una forma sencilla a servicios y métodos remotos [19].

Existen otros protocolos que proporcionan la misma funcionalidad que SOAP, tal como COBRA, Java RMI. Sin embargo SOAP utiliza y está compuesto enteramente por XML y por lo tanto es independiente del sistema operativo y del lenguaje de programación [19].

SOAP está definido en tres partes importantes [19]:

- *SOAP envelope*: Define reglas específicas para encapsular información transferida entre computadores. También puede contener información acerca de cómo debería proceder el programa en caso de una falla o error y como codificar el mensaje de error.
- Reglas de codificación de la información: Para intercambiar información, las computadoras deben estar de acuerdo en ciertas reglas de codificación de los tipos de información. Por ejemplo, en un proceso que involucre variables tipo *float*, ambos coputadores deben estar de acuerdo como se codifica ese tipo de variable. Por tanto, SOAP incluye sus propias convenciones de codificación.
- Convenciones RPC (*Remote Procedure Call*): SOAP puede ser utilizado en una variedad de sistemas de intercambio de información bien sea de un camino o de dos caminos. Las convenciones, son necesarias para que las aplicaciones del cliente puedan comunicarse de forma remota con un servidor y así recibir una correcta respuesta de parte del cliente:

Un ejemplo simple de SOAP es el servicio de medir temperatura, el cual se esquematiza a continuación.

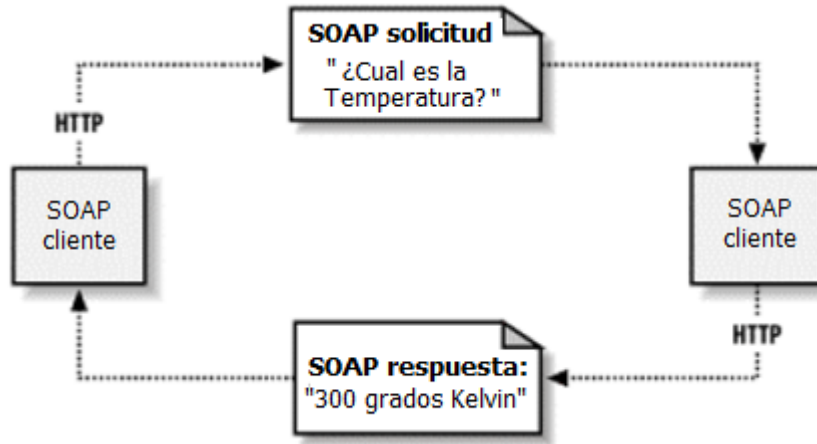


Figura 5 – Servicio de medir temperatura. Ejemplo SOAP
Adaptado de [19]

1.2.4. Mensaje en SOAP

Un mensaje en SOAP esta compuestos de las partes mostradas en la siguiente figura:

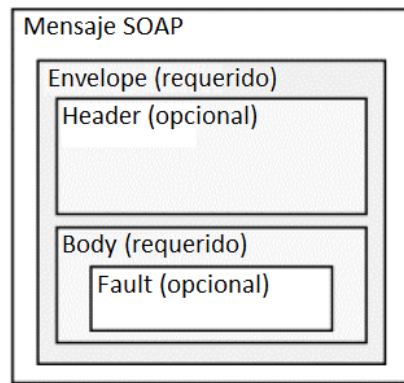


Figura 6 – Componentes de un mensaje en SOAP
Adaptado de [19]

- *Envelope*: Todos los mensajes SOAP inician necesariamente con un *Envelope*. Aquí se define la versión del programa. Se usa XML para definir dicha versión [19].
- *Header*: Es de carácter opcional. Ofrece una estructura flexible para adicionar niveles de requerimientos. Por ejemplo, el *Header* puede ser utilizado para crear servicios protegidos por contraseña [19].

- *Body*: Es la parte más importante del mensaje, ya que aquí se encapsulan las solicitudes y respuestas a un determinado servicio [19].
- *Fault*: En caso de un error, el *Body* podría contener un elemento *Fault*, el cual incluye un código de error. Dicho código permite que el mensaje actúe de una u otra forma en caso de un error [19].

1.3. Contextualización del problema

Es posible asegurar que la evolución de las comunicaciones móviles y la integración de las tecnologías de información y la comunicación dentro del campo de la salud tienen un gran potencial para ofrecer a los pacientes alternativas convincentes como reemplazo a la atención médica convencional mediante interacción síncrona con dispositivos de asistencia médica [20].

De forma general, lo que se busca con el proyecto es prestar el servicio de fisioterapia de rodilla a distancia. Desde este punto de vista, se deben abordar temáticas como la teleoperación y la telemedicina. Adicionalmente, se busca hacer claridad en los conceptos de discapacidad y más que todo en el concepto de vulnerabilidad geográfica. Este último es importante ya que la población potencialmente beneficiada con el desarrollo de este proyecto es la población que se encuentra en una condición de vulnerabilidad geográfica.

1.3.1. Teleoperación, Telemedicina y telesalud

La teleoperación permite una interacción hombre-dispositivo a distancia. Básicamente se trata del control de un actuador de forma remota por un dispositivo maestro. En general la teleoperación se ha implementado ampliamente en laboratorios remotos para varias aplicaciones en centrales nucleares, industrias de manufactura, en educación, en salud y muchas más [21]. Por ejemplo, en la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad del Valle hay un laboratorio remoto desarrollado con fines pedagógicos.

Internet ofrece la posibilidad de la realización de sistemas colaborativos de teleoperación [22] [23] [24], los cuales permiten una extensión de la acción humana, superando el problema de la distancia física con costos relativamente bajos. Así, mediante una arquitectura distribuida con orientación a servicios se hace factible actividades como telesalud y telemedicina,

viabilizando la interacción en actividades de atención de pacientes en los lugares más aislados geográficamente mediante dispositivos de asistencia médica [3].

El avance de la tecnología en informática, electrónica, mecánica, automática y control, entre otras, han permitido la interconexión de sistemas computacionales, como, computadores personales y teléfonos celulares inteligentes con dispositivos físicos por medio de internet [3] [25]. Así, la incorporación de estos avances tecnológicos en la salud ha incentivado la evolución de la medicina a distancia (conocida como telemedicina y telesalud) reglamentada en Colombia por la ley 1419 del 2010 [26]. Según dicha ley, telemedicina y telesalud se definen así:

- **Telesalud:** Es el conjunto de actividades relacionadas con la salud, servicios y métodos, los cuales se llevan a cabo a distancia con la ayuda de las tecnologías de la información y telecomunicaciones. Incluye, entre otras, la Telemedicina y la Teleeducación en salud [26].
- **Telemedicina:** Es la provisión de servicios de salud a distancia en los componentes de promoción, prevención, diagnóstico, tratamiento y rehabilitación, por profesionales de la salud que utilizan tecnologías de la información y la comunicación, que les permiten intercambiar datos con el propósito de facilitar el acceso y la oportunidad en la prestación de servicios a la población que presenta limitaciones de oferta, de acceso a los servicios o de ambos en su área geográfica [26].

1.3.2. ¿Qué es discapacidad?

Como se ha mencionado con anterioridad, este trabajo está enfocado a hacer uso de las tecnologías de la información y adaptarlas a la fisioterapia y así poder prestar el servicio de telefisioterapia. De una forma más específica, se está prestando especial atención a discapacidades de la articulación de rodilla relacionadas con los movimientos de flexión y extensión (se hace más claridad al respecto en el Capítulo 4).

Desde este punto de vista, la pregunta inmediata es ¿Qué es discapacidad? Según [27] la discapacidad es un concepto que resulta de la interacción entre las personas con deficiencias y las barreras debidas a la actitud y al entorno que evitan su participación plena y efectiva en la sociedad, en igualdad de condiciones con las demás personas.

Dicho de otra manera, se considera a persona con discapacidad a toda persona que padezca una alteración funcional permanente, transitoria o prolongada. Dicha discapacidad podría ser de tipo motora, sensorial o mental, e implica desventajas considerables para la adecuada integración social y laboral de la persona [28]. Es preciso resaltar que en el presente trabajo, se tiene como interés a las discapacidades motoras de tipo transitorias, y más específicamente en la articulación de rodilla.

1.3.3. ¿Qué es rehabilitación?

El concepto de rehabilitación está dado por la OMS (Organización Mundial de la Salud) y se define como el conjunto de medidas médicas, sociales, educativas y profesionales para preparar o readaptar al individuo con objeto de que alcance la mayor proporción posible de capacidad funcional [29]. Para nuestro caso, se propone cambiar la rehabilitación convencional basada en múltiples sesiones lo que implica la presencia del paciente en un centro de salud especializado.

Como ejemplo de aplicación, se propone una alternativa de rehabilitación teleoperada para discapacidad de rodilla. La máquina de rodilla que será utilizada para la implementación, realiza los movimientos de flexión y extensión. En este contexto, se abordará la telefisioterapia de una máquina de rehabilitación de rodilla con movimientos con estas características. Esto se ampliará en el Capítulo 4.

1.3.4. Vulnerabilidad geográfica

Para este trabajo, se entenderá vulnerabilidad geográfica como la unión de dos factores:

- Primero, la falta de recursos tanto técnicos como humanos en ciertas zonas, generalmente de tipo rural. Esto causa que una persona que viva retirada de una ciudad principal, con alguna discapacidad transitoria, tenga que desplazarse a un centro de salud para poder acceder a un servicio de salud de calidad. Dicho desplazamiento pone en riesgo su integridad y su salud.
- Segundo, y como agravante es un bajo nivel socio-económico que impide que un paciente pueda desplazarse a un centro hospitalario para recibir atención médica de calidad. Esto genera que incluso personas que vivan en ciudades principales, pero que

sean residentes de barrios marginados, no puedan recibir la atención médica que merecen, y en su lugar tienen que conformarse con la atención médica que sus condiciones sociales y económicas lo permitan.

Resumen del capítulo

En este capítulo se mencionaron aspectos fundamentales a tener en cuenta en el desarrollo de este proyecto. Empezando por un aspecto teórico para definir un sistema distribuido así como también las características principales que debe tener una arquitectura SOA. Dados los alcances del proyecto, se dieron conocer de forma general los WS debido a que es una forma de implementar una arquitectura con orientación a servicios. También, en este capítulo, se abordaron temáticas que enmarcan el presente trabajo, tales como telemedicina, discapacidad, rehabilitación y vulnerabilidad geográfica.

Capítulo 2. Estado del arte y metodología propuesta

En este capítulo, se presentan inicialmente la metodología que se siguió para dar cumplimiento a los objetivos trazados. Se revisan los avances que se han realizado en el campo de la telemedicina tanto en Colombia como en el mundo. Luego, se explica brevemente la herramienta de modelado que fue utilizada.

2.1. Metodología propuesta

De forma general, se realizó una revisión bibliográfica para contextualizar el problema. Todo esto con el fin de definir correctamente los servicios que están involucrados en el sistema. Una vez definidos los servicios, es necesario saber cómo se relacionan entre sí para asegurar el adecuado funcionamiento de la arquitectura. Para esto, se utilizó una herramienta formal como son las Redes de Petri (que se explicará con más detalle en la sección 2.4) para especificar los servicios y determinar la forma en que estos servicios se comunican. Luego del adecuado modelamiento del sistema, se realizan los códigos necesarios para dar funcionamiento a la arquitectura planteada en los modelos, adaptándolos a un ejemplo de aplicación, que en este caso, fue una máquina de movimiento pasivo para rehabilitación de rodilla. Por último se proponen algunos escenarios de validación de la arquitectura para comparar el funcionamiento real contra al modelamiento realizado. A continuación se muestra de forma esquemática la metodología empleada para el desarrollo de este proyecto.

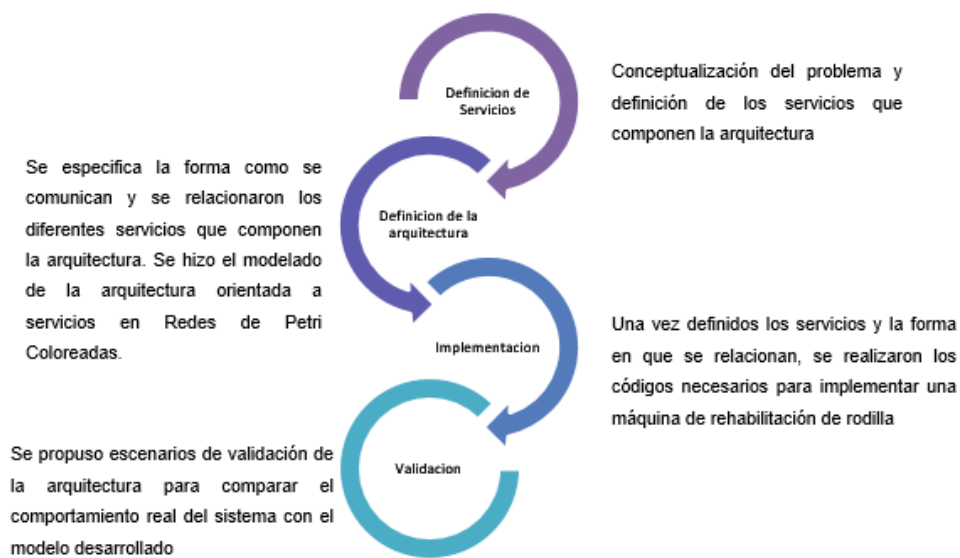


Figura 7 – Metodología implementada
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura 7 y siguiendo la metodología, se puede decir que la definición de los servicios (correspondiente a la primera etapa de la metodología) se realiza en el Capítulo 3. Posteriormente, en el Capítulo 4 se concluye la definición de la arquitectura aplicada al ejemplo de aplicación así como la implementación del mismo. Por último, en el Capítulo 5 se proponen los escenarios de validación.

2.2. Telemedicina en Colombia

En Colombia la telemedicina la han desarrollado distintas EPS como SaludCoop [30]. Dicho grupo cuenta con 32 puntos con cámara de telemedicina en 23 departamentos del país, los cuales se apoyan en las clínicas de mayor complejidad para mejorar su capacidad resolutive. Este programa de medicina se inició en el 2002 como soporte a la gran dispersión geográfica que hay en el país. La mayor demanda de especialistas es en las áreas de cardiología, neumología, dermatología, oncología, ginecología y pediatría [30]. Básicamente, este tipo de telemedicina se hace de manera asíncrona. Es decir, que los pacientes suben a una base de datos (o un repositorio) toda la información acerca de un determinado proceso, por ejemplo: radiografías, electrocardiogramas...etc. De forma paralela, pero no sincronizada, hay médicos especialistas ingresando a dicha base de datos para así dar diagnósticos, formulas médicas, remisiones, entre otros.

En [2], se presenta un estudio realizado por la universidad Nacional de Colombia, enfocado a prestar el servicio de telemedicina en el área de la radiología (Tele-radiología). Para tal fin fue desarrollado un sistema de información propio, el cual incluye un sistema de administración de imágenes, un sistema de firma digital y una plataforma educativa. El objetivo de esta arquitectura es que sea posible subir información en forma de imágenes de los pacientes para que posteriormente sean analizadas por los Radiólogos.

Por su parte en [31] se trata el problema de la telemedicina aplicado a consultas psiquiátricas, el cual es un trabajo desarrollado por la Universidad CES de Medellín. En este trabajo, lo que proponen los autores es una estructuración de un protocolo de tele-consulta para pacientes con problemas enmarcados en la psiquiatría. Para tal fin, desarrollaron una aplicación web a través de la cual se proveen los servicios de diagnóstico y control de pacientes mediante videoconferencias.

Otro ejemplo de telemedicina es el realizado en [32]. En este trabajo se diseña y se desarrolla un prototipo de un sistema de información de gran utilidad para los médicos generales sirviéndole de apoyo y soporte para la consulta y modificación de historias clínicas, remisión a especialistas así como realizar la debida receta clínica para cada paciente. Este fue un trabajo desarrollado por estudiantes de la Universidad Distrital de Bogotá.

En [33] se presenta un trabajo desarrollado por grupos de investigación de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Tunja) y la Universidad Antonio Nariño (Bogotá). Dicho trabajo se enmarca en el campo de la telefisioterapia y tiene como objetivo atender personas con trastornos motores en el miembro superior. La arquitectura que se propone en esta investigación sirve para realizar el monitoreo del movimiento biomecánico de un paciente para que el médico especialista pueda obtener información del movimiento de una persona para así dar su concepto acerca del avance y en qué etapa de la recuperación se encuentra.

En [34], se presenta el desarrollo de una plataforma para apoyar a hospitales de bajos recursos y aislados geográficamente, ubicados en el departamento del Valle del Cauca. Dicha plataforma es principalmente de teleducación (en rehabilitación física) a las comunidades aisladas para que dichas comunidades ayuden dentro de lo posible a la rehabilitación del paciente. También, la plataforma que desarrollaron en este proyecto, tiene como objetivo filtrar las consultas para así poder determinar si se necesita que el paciente se desplace a un centro médico especializado.

2.3. Telemedicina en el mundo

La telemedicina se ha venido desarrollando desde algunos años y adquiere importancia en países en los que la cobertura de salud es insuficiente para la población. Un ejemplo de esto es la parte de África llamada “áfrica negra” o “áfrica subsahariana” en la que la mayor parte de los hospitales se encuentran en las zonas urbanas y los habitantes de las zonas rurales (que componen el 70% de la población) se ven obligados a desplazarse largas distancias para recibir tratamientos médicos [35]. En Etiopía (por ejemplo), se ha brindado ayuda vía web en tele-oftalmología, tele-consultas y servicios de tele-educación [35].

Por otro lado, en zonas geográficamente aisladas de Mongolia se ha implementado la telemedicina con el objetivo de reducir las muertes de niños y mujeres embarazadas [6]. Esto se llevó a cabo realizando telemedicina enfocada al cuidado maternal y neonatal donde se realizaron consultas de embarazos de alto riesgo, diagnóstico prenatal de ultrasonido, monitoreo fetal y detección de anomalías del cuello uterino mediante colposcopia. Este proyecto comenzó en septiembre de 2007 y para el 2009 ya se habían tratado 598 casos, de los cuales el 64% eran de tipo obstétrico, 21% eran patologías ginecológicas y el 15% fueron patología neonatal. Solo 36 pacientes (de 598) fueron remitidos a un centro de salud urbano [6].

De igual forma, varias iniciativas han sido desarrolladas en países como Brasil, tal como la red universitaria de telemedicina, que actualmente conecta a 55 hospitales universitarios y se espera lograr una conexión entre 80 instituciones a lo largo de todos los estados brasileros [7]. Adicionalmente, el Programa Nacional de Atención Primaria de Salud, Telesalud, actualmente integra 11 estados y 1100 municipios [8].

Por otra parte, hospitales universitarios de varios estados (de Brasil) han implementado un programa de telesalud, como es el caso de los Hospitales universitarios de los estados de Mina Gerais y Sao Paulo [7]. En [36] es presentado resultados en el área de capacitación del programa nacional de telesalud en Brasil. Sin embargo, pocos trabajos han sido presentados con características de teleoperación de dispositivos de asistencia médica.

En [37] se propone la implantación de un sistema de telemedicina para mejorar la atención médica en pacientes de dificultades cardiorrespiratorias y la importancia de monitorear su estado en tiempo real. Las ventajas fundamentales de este sistema propuesto es un aumento de la eficiencia a través de la optimización de los recursos asistenciales y la disminución de los desplazamientos del paciente a los centros de salud. Para tal fin, se coloca una especie de brazalete al paciente el cual será de gran utilidad para realizar el monitoreo del mismo 24 horas al día, 7 días de la semana.

En [38] se presenta la telemedicina como un medio para prevenir y diagnosticar enfermedades a tiempo realizando un monitoreo continuo de los signos vitales del paciente. En este contexto, los autores proponen una arquitectura orientada a servicios que permita realizar dicho monitoreo a distancia. Para tal fin han propuesto una arquitectura con cuatro módulos: los tres primeros corresponden a la recepción, transformación y análisis de datos

de los signos vitales. El último módulo permite la comunicación y el acceso a los servicios médicos. Toda la arquitectura fue desarrollada teniendo en cuenta los principios de SOA.

Otro ejemplo de telemedicina, y más específicamente en fisioterapia, es el estudio realizado en [39] el cual presenta una innovadora plataforma de telefisioterapia, implementada a través de internet, la cual brinda apoyo a la fisioterapia tradicional que normalmente está basada en sesiones que el paciente debe cumplir continuamente en hospitales. La plataforma desarrollada, proporciona una salida visual tridimensional para retroalimentar al paciente para así motivarlo y mostrar el avance en la terapia desarrollada.

Por su parte, en [40] se muestra el desarrollo de una plataforma virtual de rehabilitación, dirigida a personas mayores (3ra edad) con reemplazo de rodilla, la cual es una cirugía muy frecuente en esta población. La plataforma cuenta con material dinámico en forma de texto, imágenes o video con el fin de apoyar el proceso de rehabilitación. También se realiza un monitoreo de los movimientos de la persona con el uso de unos sensores que son capaces de captar los movimientos del paciente. Posteriormente estos datos se transmiten a un especialista para ser analizados.

En [41] se presenta el diseño de un prototipo de un sistema integrado de telemedicina móvil. Dicho sistema consta de dos partes: Una parte donde se realiza la medición de una señal, y la otra parte en donde se realiza el procesamiento de la señal. Se utiliza una red para transmitir audio y video de los signos vitales de una persona en una ambulancia en movimiento para ser entregada al computador personal del médico. Los signos vitales que se monitorean son la presión arterial, la saturación de oxígeno en la sangre, temperatura corporal del cuerpo, concentración de glucosa en la sangre, frecuencia de latido del corazón, entre otros. Este es un prototipo creado con el ánimo de apoyar al área de emergencias en un hospital con el fin de ahorrar tiempo que podría ser vital para el bienestar del paciente.

En [42], es presentado un estudio de monitoreo del movimiento de una persona con fines fisioterapéuticos. Lo que se hace en este trabajo, es conectar una serie de sensores al cuerpo de una persona y así mismo se le asigna unos ejercicios que el paciente puede hacer en su casa. Con ayuda de los sensores, el medico es capaz de obtener información acerca del avance y estado del paciente. La arquitectura propuesta tiene 3 partes principales: el área del cuerpo, los ejercicios y la adquisición de la información. El área del cuerpo se relaciona directamente con los diferentes sensores que se deben colocar en el paciente de tal manera que la información obtenida sea almacenada. Por su parte los ejercicios se refiere

a una serie de actividades que el medico ha dispuesto para el paciente con el fin de obtener información acerca del estado rehabilitación. Esto permite que el medico pueda aumentar el nivel de intensidad de los ejercicios para poder seguir con la mejoría.

En [43] se presenta un dispositivo para fisioterapia que funciona como una máquina de movimiento activo donde hay sensores dispuestos en la máquina de tal manera que se obtiene datos cuando el paciente realiza un movimiento y así conseguir información de las extremidades del paciente. Este sistema fue creado para ser conectado fácilmente a internet y realizar monitoreo de pacientes en sus casas, redes de hospitales, estaciones de investigación o aplicaciones de telemedicina.

En [44] y [45] se presenta un dispositivo denominado NeXOS, el cual tiene como finalidad ayudar al fisioterapeuta en el proceso de rehabilitación de un paciente con lesiones en las extremidades inferiores. Adicionalmente posee un sistema capaz de conectarse a internet para interactuar con otro especialista (que se encuentra geográficamente distante) en el proceso de rehabilitación del paciente. Es de apuntar que este trabajo no posee una arquitectura con orientación a servicios y tampoco un modelamiento de la misma.

En [46] se presenta un desarrollo de un sistema de monitoreo de información en telemedicina. Este sistema recibe de primera mano señales de signos vitales vía *wireless*. Los signos vitales que se miden en este caso son: presión en la sangre, niveles de glucosa, temperatura corporal, entre otros. Estas mediciones se envían vía internet a un centro de salud a través de una plataforma de información del servicio de salud. Este servicio integrado de telemedicina, se basó en el concepto de SOA y utilizando a su vez la tecnología *web-service* para facilitar la integración entre sistemas heterogéneos.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los antecedentes mencionados:

Trabajo	Descripción	¿Utiliza una herramienta formal de modelado?	¿Es orientado a servicios?	¿La comunicación es síncrona o asíncrona?
[2]	Diagnósticos y Teleconsultas en Radiología	No	No	Asíncrona
[30]	Teleconsultas y diagnósticos en varias especialidades	No	No	Asíncrona
[31]	Videoconferencias y diagnósticos en psiquiatría	No	No	Asíncrona
[32]	Medicina general. Plataforma para remitir, diagnosticar y recetar.	No	No	Asíncrona
[33]	Monitoreo de movimiento para ayudar en la Fisioterapia	No	No	Asíncrona
[34]	Plataforma de teleeducación en rehabilitación a comunidades	No	No	Asíncrona
[6]	Pediatría y cuidado neonatal a distancia	No	No	Asíncrona
[7], [8], [36]	Telemedicina general y Teleconsultas	No	No	Asíncrona
[35]	Oftalmología y educación	No	No	Asíncrona
[37]	Monitoreo señales cardio-respiratorias	No	No	Asíncrona
[38]	Monitoreo signos vitales	No	Si	Asíncrona
[39]	Plataforma para fisioterapia. Monitoreo de movimiento	No	No	Asíncrona
[40]	Plataforma para rehabilitación de rodilla en personas de 3ra edad	No	No	Asíncrona
[41]	Monitoreo signos vitales para emergencias	No	No	Asíncrona
[42]	Monitoreo de movimiento para apoyar la fisioterapia del paciente	No	No	Asíncrona
[43]	Fisioterapia utilizando máquinas de movimiento activo para monitoreo del movimiento	No	No	Asíncrona
[44], [45]	Fisioterapia	No	No	Síncrona
[46]	Monitoreo de signos vitales	No	Si	Asíncrona

Tabla 1 – Resumen Antecedentes telemedicina

En general, de la Tabla 1 se observa que los trabajos citados en telemedicina, son desarrollos que carecen de una especificación formal de modelado. Adicionalmente, presentan un enfoque diferente a orientación a servicios lo cual limita la escalabilidad del sistema y posibilidad de interacción paciente-profesional de la salud independientemente de la localización geográfica de los mismos. De ahí, la importancia del desarrollo del presente trabajo que atiende estas limitaciones, ya que se está pensando en un sistema síncrono el cual será concebido y analizado con la utilización de una herramienta formal de modelado (Redes de Petri), asegurando la orientación a servicios de la arquitectura propuesta.

2.4. Herramienta de modelado

Como se ha mencionado con anterioridad, se utilizará como herramienta formal de modelado las Redes de Petri Coloreadas, es por eso que es importante dar una definición y explicación de esta herramienta.

2.4.1. Redes de Petri

Las Redes de Petri son una herramienta de modelado gráfico-matemática utilizada para estudiar el comportamiento de varios tipos de sistemas, como por ejemplo sistemas que presentan comportamiento concurrente, asincrónico, distribuido, paralelo, no determinístico y/o estocástico [47] [48] [49].

Una Red de Petri es una herramienta gráfico-matemática para el modelamiento de sistemas a eventos discretos, la cual permite visualizar elementos y entidades que conforman el sistema de forma explícita; por lo tanto su parte estructural puede ser considerado como una herramienta de diseño similar al diagrama de flujo y diagrama de bloques, la cual ha sido utilizada con éxito en la especificación de sistemas críticos y distribuidos [48] [49]. Como herramienta matemática, es posible establecer ecuaciones de estado, ecuaciones algebraicas y otro tipo de modelos matemáticos que gobiernen el comportamiento de un sistema [48].

Las Redes de Petri fueron creadas en el año 1962 por Carl Adam Petri. A continuación se presentan los principales componentes de una Red de Petri [50]:

- Lugares (p): representados gráficamente mediante circunferencias
 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, es un conjunto finito de lugares, $n \geq 0$.

- Transiciones (t): representadas por segmentos rectos verticales
 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, es un conjunto finito de transiciones, $m \geq 0$.
- Arcos dirigidos (flechas): definen las entradas y/o salidas de una transición a un lugar o de un lugar a una transición.
- Marcas ("token"): una marca se representa mediante un punto en el interior de un lugar. Los lugares contienen un número cualquiera de marcas; las transiciones consumen marcas desde un lugar de entrada y generan marcas a los lugares de llegada.

De forma general, los lugares y las transiciones tienen las siguientes características:

- Cada lugar tiene asociado un estado del sistema.
- A las transiciones se les asocia eventos para que suceda un cambio de estado

Una transición está habilitada si cada lugar de entrada tiene como mínimo una cantidad de marcas igual al peso del arco que tiene asociado. Esto se muestra esquematizado a continuación:

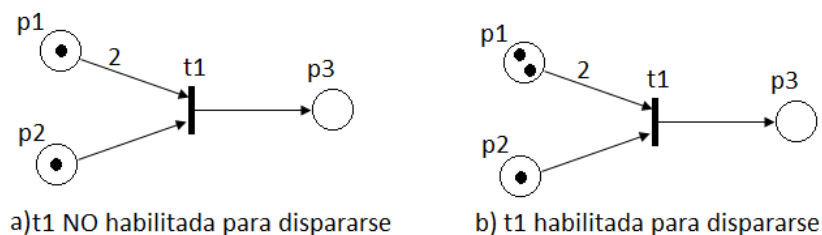


Figura 8 – Condición de disparo
Fuente: Elaboración propia

Las Redes de Petri, son una herramienta que permite realizar el modelado de un sistema cuya dinámica es orientada por la ocurrencia de eventos. Sin embargo, una Red de Petri Ordinaria podría resultar en una explosión de estados en virtud de la complejidad del sistema comprometiendo el análisis del mismo. Esto motivó a hacer uso de una extensión de las redes de Petri ordinarias, llamadas Redes de Petri Coloreadas.

2.4.2. Redes de Petri Coloreadas

Las Redes de Petri Coloreadas (*Coloured Petri nets* o CPNs) son un lenguaje gráfico para construir modelos de sistemas concurrentes y analizar sus propiedades. Las CPNs es un lenguaje de modelado de sistemas a eventos discretos que combina las ventajas de las Redes de Petri Ordinarias con las capacidades de un lenguaje de programación de alto nivel [51].

En las Redes de Petri Coloreadas, es posible definir variables, funciones, ciclos y condiciones que permiten que la red brinde información más específica del funcionamiento del sistema. A cada lugar es posible asignarle un color, el cual es una información característica que permite diferenciar los tipos de información que contiene el sistema [51].

Un ambiente de simulación, para trabajar con CPNs es el software llamado CPNTOOLS el cual es gratuito y funciona independiente del sistema operativo (ver Figura 9).

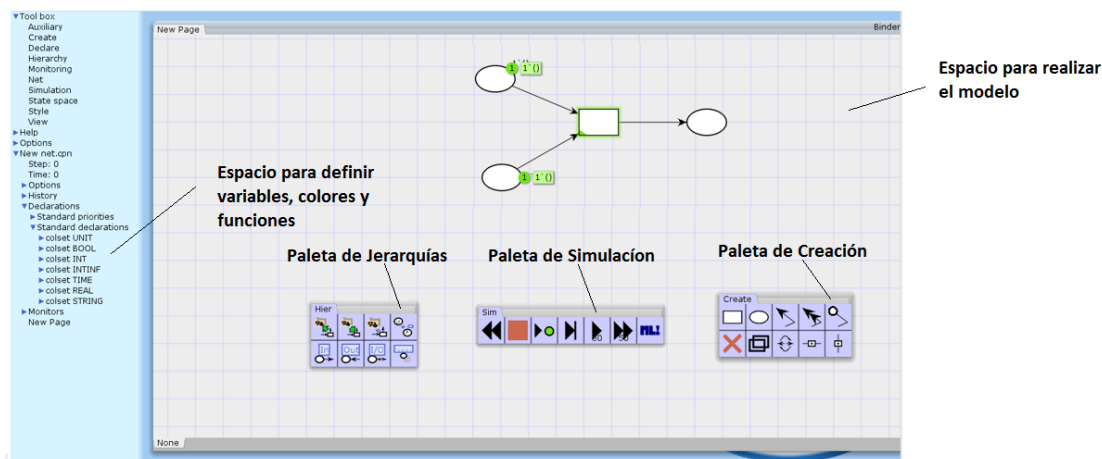


Figura 9 – Espacio de trabajo cpntools
Fuente: Elaboración propia

El software CPNTOOLS es un ambiente de trabajo que permite realizar modelos en Redes de Petri Coloreadas permitiendo simular y verificar el comportamiento del sistema ante múltiples escenarios. En otras palabras, CPNTOOLS es un software para crear, editar y analizar Redes de Petri Coloreadas. Si se requiere de más información, visitar el sitio web oficial: <http://cpntools.org/>.

Resumen del capítulo

En este capítulo, se presentó la metodología que se siguió para dar cumplimiento a los objetivos. Luego se mostró el estado del arte en Colombia y en el mundo acerca de trabajos en telemedicina desarrollados y se concluyó que la mayoría de dichos trabajos consultados no habían sido concebidos desde un enfoque orientado a servicios y mucho menos se ha utilizado una herramienta formal de modelado para su diseño. Por último se realizó una introducción a las Redes de Petri Ordinarias y Coloreadas para luego dar a conocer la interfaz de modelamiento (CPNTOOLS).

Capítulo 3. Definición de la arquitectura

En este capítulo se, se presenta de forma general la arquitectura propuesta para el sistema de teleoperación de máquinas de movimiento pasivo para rehabilitación física. Se inicia realizando una conceptualización macro del problema para así definir los diferentes servicios y actores involucrados en el sistema.

3.1. Conceptualización del problema y definición de servicios

Para el desarrollo de la arquitectura, el sistema se considera distribuido con una dinámica orientada por la ocurrencia de eventos, es decir, considerando el sistema como a eventos discretos (SEDs). También, se tuvo en cuenta la utilización de herramientas formales para el modelado como la Red de Petri.

De tal forma, se realizó una acertada especificación del sistema orientada a la teleoperación vía internet de actuadores y dispositivos de asistencia médica [52]. Este proyecto concibe una implementación de dispositivos de asistencia en el área de la rehabilitación de la articulación de rodilla.

En términos generales, la Figura 10 presenta una arquitectura de la posible solución al problema planteado. Donde, se debe brindar una interface de acceso para profesionales de la salud. Así, es viabilizada la interacción del paciente con el profesional especializado.

Considerando que para valoración de los protocolos médicos y constitución del sistema es importante un registro de los históricos de la dinámica del sistema, se debe tener en cuenta la especificación de bases de datos.

Además la heterogeneidad de un sistema de salud, en referencia a la variedad de dispositivos y sistemas de comunicación, entre otros parámetros, se plantea una arquitectura cliente-servidor con orientación a servicios, la cual pueda ser implementada independiente del sistema operativo y el lenguaje de aplicación.

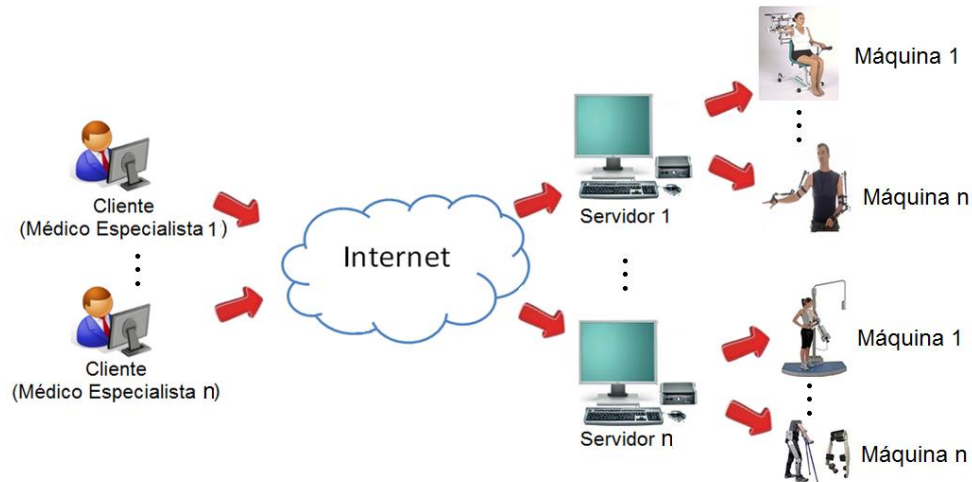


Figura 10 - Sistema cliente-servidor con orientación a servicios
Fuente: Elaboración propia

La Figura 11 muestra el sistema cliente - servidor aplicado a la máquina de rodilla que se va a implementar. La idea es realizar el control distribuido de una máquina de movimiento pasivo mediante un computador utilizando internet. Se planea utilizar *web service* para la implementación de la arquitectura lo cual permitirá que el sistema se vuelva escalable para múltiples maquinas así como para múltiples clientes.

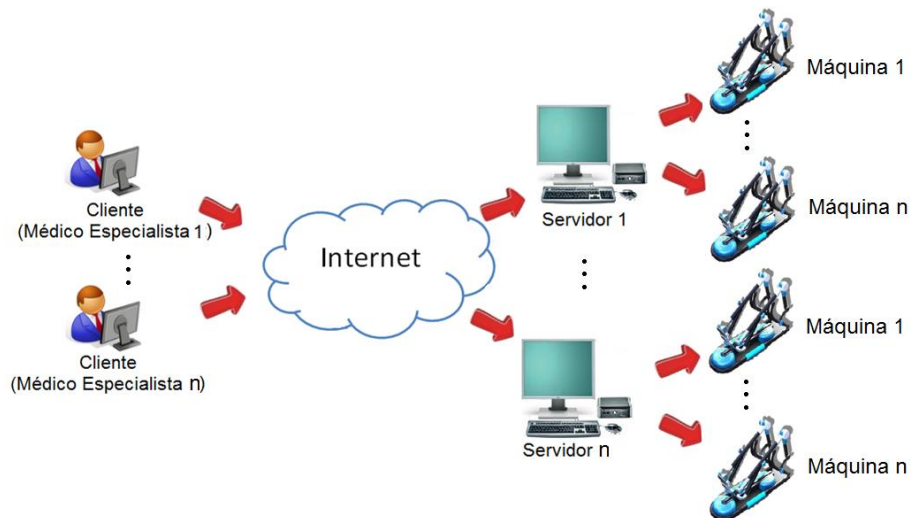


Figura 11 - Sistema cliente-servidor para máquina de rodilla
Fuente: Elaboración propia

La máquina de rodilla (que servirá como ejemplo de aplicación de este proyecto) es una máquina de movimiento pasivo. Movimiento pasivo significa que la articulación se mueve sin

que los músculos del paciente se estén utilizando para inducir el movimiento. Los dispositivos de movimiento pasivo son máquinas que se han desarrollado para que los pacientes los usen para tratar lesiones [53].

3.1.1. Definición de los servicios y actores del sistema

El sistema que se va a desarrollar en este trabajo, es un SD con orientación a servicios. A continuación se presenta un esquema explicativo del funcionamiento general de la arquitectura a desarrollar.

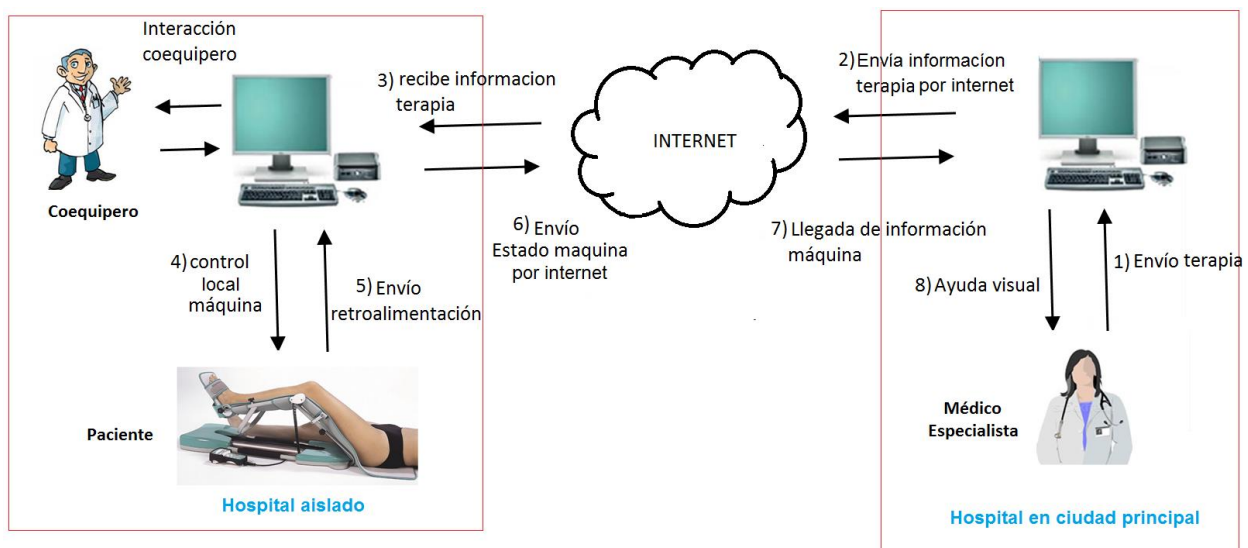


Figura 12 - Funcionamiento general del sistema
Fuente: elaboración propia

Algo importante por destacar en la Figura 12 son las personas que intervienen en la terapia, los cuales se describen a continuación:

- **Médico Especialista:** Está ubicado en un hospital de alta tecnología y será el encargado de realizar la terapia correspondiente de acuerdo a la historia clínica del paciente.
- **Paciente:** Será la persona que se encuentra en el hospital aislado recibiendo la terapia suministrada por el Médico Especialista.

- Coequipero: Es de gran importancia, ya que es una persona de apoyo en el proceso de la terapia. Este coequipero debe estar en el hospital aislado para ayudar al paciente en las tareas de conexión del dispositivo, así como de informar al médico del proceso de terapia.

Desde este punto de vista, y tratando de desarrollar una arquitectura orientada a servicios para el problema de teleoperación de máquinas de movimiento pasivo para rehabilitación física, se han definido los siguientes servicios:

- Servicio de teleoperación: Aquí es donde se generan los telecomandos para el control de la maquina en cuestión y se generan todos los procesos necesarios para llevar a cabo la terapia. Este servicio será activado o consumido por el médico especialista
- Servicio de Hospital aislado: Este servicio será encargado de recibir los telecomandos, enviarlos a la máquina y realimentar al servicio de teleoperación acerca del estado de la terapia ejecutada.
- Servicio Maquina de rehabilitación física: Esta encargado de la ejecución de la terapia y la interacción con el paciente. Aquí se encuentran los sensores, actuadores del sistema y la maquina o dispositivo de asistencia médica.

3.2. Arquitectura general del sistema

A continuación se muestra la arquitectura general del sistema de teleoperación de máquinas para rehabilitación, donde se muestra la forma en que se comunican los diferentes servicios y cómo interactúan con las personas que intervienen:

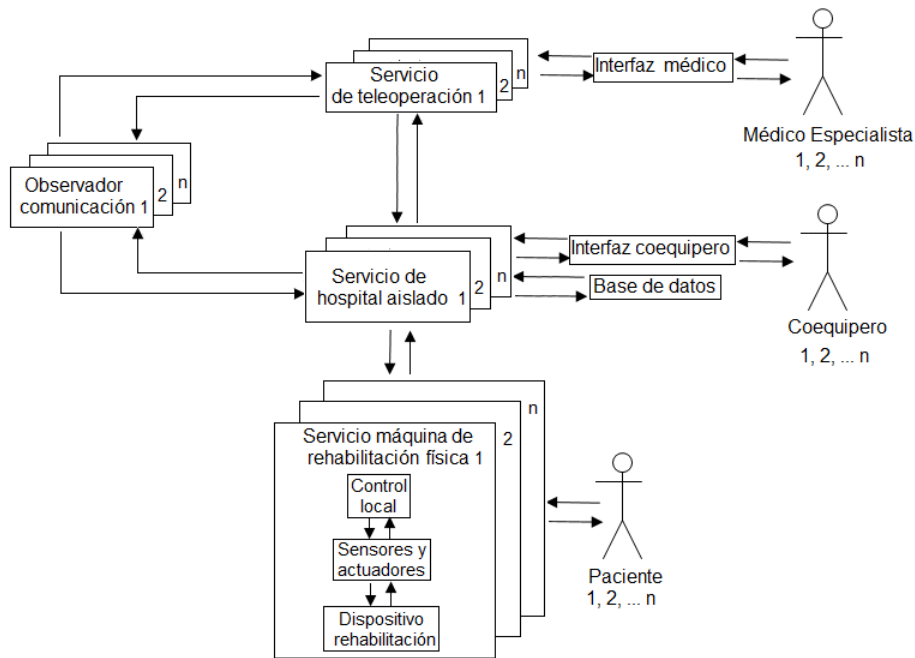


Figura 13 – Arquitectura general del sistema
Fuente: Elaboración propia

De forma general, el sistema permite que un médico especialista, sea capaz a través de una “Interfaz médica”, envíe comandos de teleoperación a una máquina de rehabilitación física vía internet. Este contexto, facilita la atención especializada a un paciente que se encuentra geográficamente distante. Para tal fin, tanto el servicio de teleoperación como el servicio de hospital aislado deben cumplir ciertas operaciones que se muestran en la Figura 14 y Figura 15.

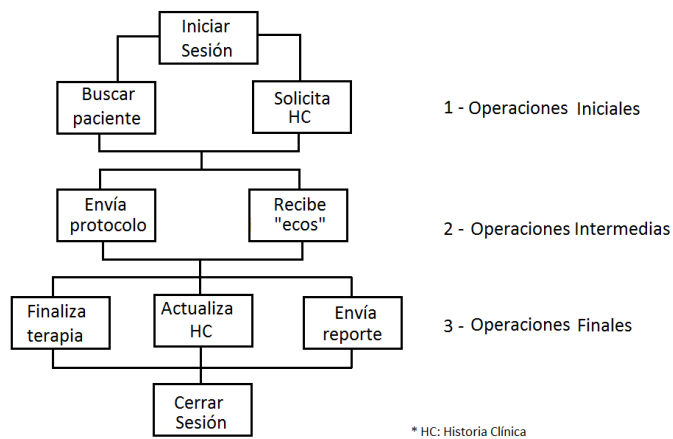


Figura 14 – operaciones generales Servicio Teleoperación
Fuente: Elaboración propia

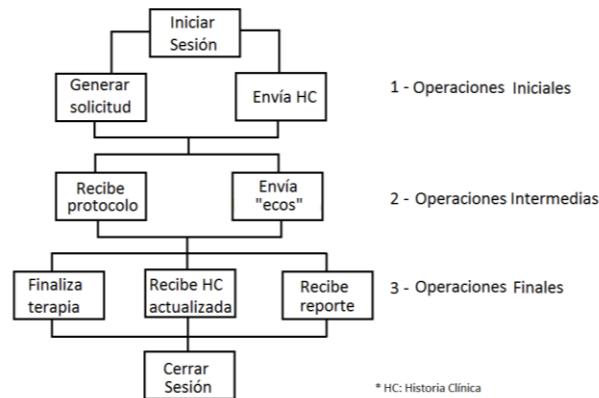


Figura 15 - operaciones generales Servicio Hospital Aislado
Fuente: Elaboración propia

En estas figuras, se esquematizan las funciones generales que deben llevarse a cabo en dos de los servicios principales de la arquitectura, para que el médico pueda realizar una sesión de rehabilitación física a un paciente geográficamente distante. Es importante aclarar que el Servicio de Hospital Aislado debe generar una retroalimentación continua en forma de “eco” al Servicio de Teleoperación para que este último conozca el estado actual de la terapia.

Resumen del capítulo

Se entendió el problema y se planteó la arquitectura para permitir que un médico especialista pueda realizar un proceso de fisioterapia de rodilla a un paciente que se encuentra geográficamente distante. Para tal fin primero se definieron los servicios que intervienen así como también la forma en que deben relacionarse. De esta manera, se obtuvo 3 servicios principales (Servicio de teleoperación, de máquina de rodilla y de hospital aislado) y 3 participantes o actores de la arquitectura (Médico especialista, paciente y coequipero). En este capítulo se dio cumplimiento al primer objetivo específico que trata de la definición de los servicios involucrados.

Capítulo 4. Ejemplo Aplicación, modelado del sistema e implementación

Como se ha mencionado con anterioridad, como ejemplo de aplicación, se propone realizar la teleoperación de una máquina de rehabilitación de rodilla. En este capítulo, se adapta la arquitectura planteada en el Capítulo 3 al caso de estudio mencionado. Se da a conocer el modelo planteado para el caso de estudio, mostrando la forma en que se comunican los diferentes servicios definidos anteriormente. Al final de este capítulo se observa la implementación correspondiente al modelo realizado.

4.1. Conceptualización del problema

Para la implementación se planea la operación, por medio del envío de comandos vía internet, de una máquina para articulación de rodilla, la cual fue desarrollada en el marco de trabajos de grado, tales como [53]. En general la rodilla tiene varios grados de libertad, sin embargo la maquina diseñada está limitada a realizar los movimientos de extensión y de flexión (ver Figura 16).

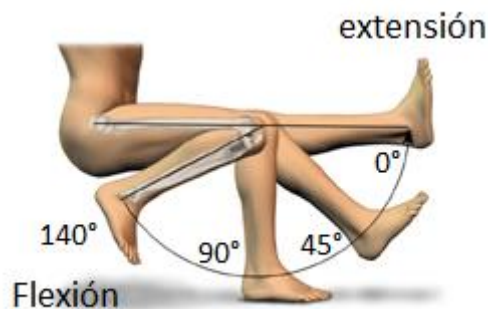


Figura 16 - Flexión y extensión de una rodilla
Fuente: [53]

Las características de la máquina de rodilla son los siguientes [53]:

Extensión máxima /Flexión máxima	-10° a 140°
Tiempo de terapia	1 a 240 min
Tiempo entre cambio de movimiento (<i>delay</i>)	0 a 30 segundos
Velocidad de movimiento	30°/minuto a 150°/minuto

Tabla 2 – Requerimientos de diseño de la máquina de rodilla

En la Figura 17 se muestra una vista de la máquina de rodilla que fue implementada. Donde, el mecanismo es accionado por un motor eléctrico que acciona un tornillo de potencia que a su vez realiza el movimiento de un mecanismo que induce los movimientos de flexión y extensión de rodilla.

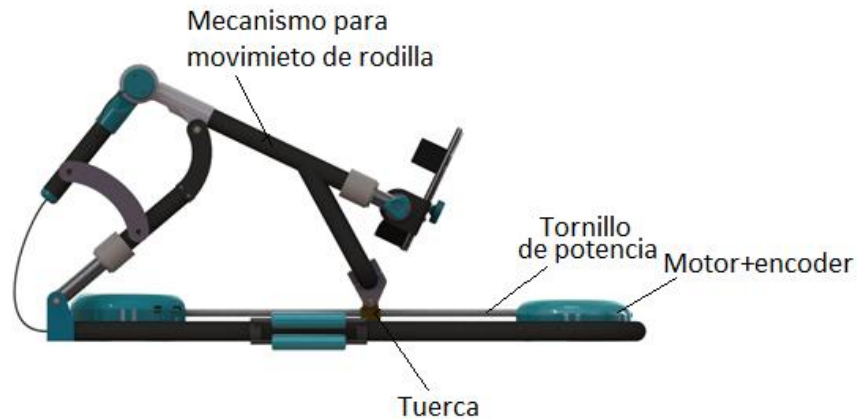


Figura 17 - Máquina de rehabilitación de rodilla
Fuente: [53]

Para controlar la velocidad y la posición del mecanismo de forma local, se utilizó el montaje esquematizado en la Figura 18.

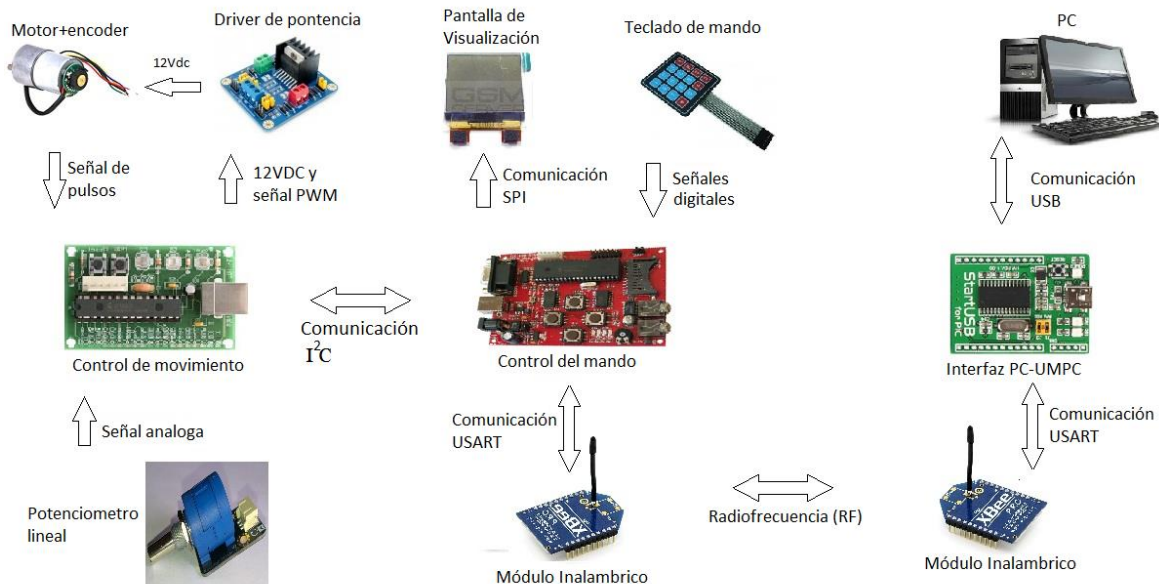


Figura 18 - Control local de la máquina de rehabilitación de rodilla
Fuente: [53]

La terapia se puede realizar desde un computador de forma inalámbrica así como también es posible realizarla desde un teclado de mando el cual se encuentra conectado directamente a la máquina de rehabilitación de rodilla.

De forma general, el funcionamiento de la máquina, se compone de 3 etapas:

- *Etapas de potencia:* La cual es necesaria para alimentar los motores y dispositivos involucradas
- *Etapas de control:* Es importante porque contiene el hardware y software necesario para que la maquina realice los movimientos de flexión y extensión requeridos por el usuario a la velocidad deseada.
- *Etapas de comunicación:* El usuario puede comunicarse con la maquina con el objetivo de establecer los parámetros de funcionamiento de la maquina (ver Tabla 2). La interacción hombre-dispositivo, es posible realizarla de dos maneras. Una es con el control de mando y la otra es por medio de un computador.

A continuación se muestra la ubicación de los componentes electrónicos y de control en la máquina de rodilla:

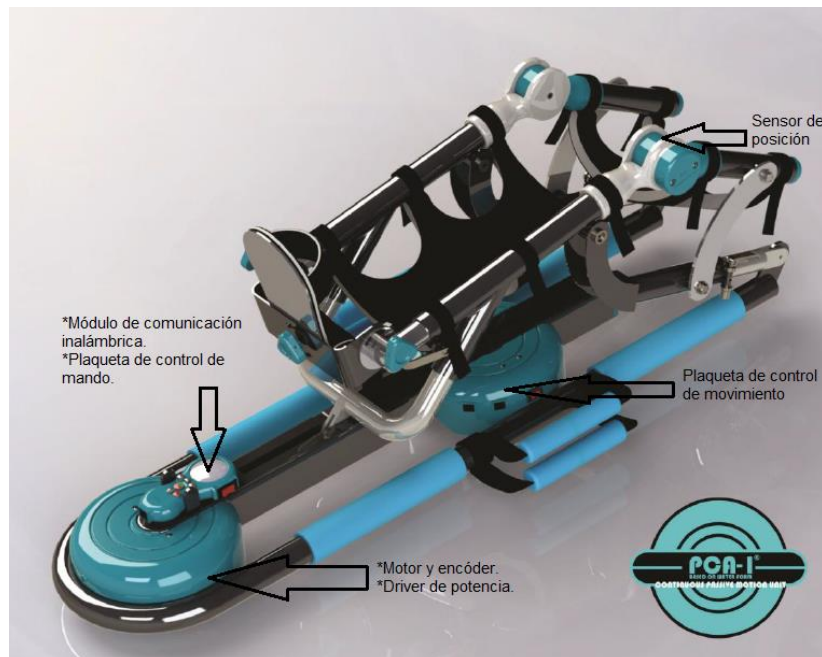


Figura 19 - Disposición de los elementos de control en la máquina de rodilla

Fuente: [53]

La máquina fue construida en colaboración con el SENA y Tecno-parque Colombia nodo Cali. En la Figura 20 se muestra el resultado final obtenido de la construcción de dicha máquina.



Figura 20 – Fotografía maquina construida
Fuente: elaboración propia

4.2. Definición de la arquitectura para caso de estudio

Anteriormente, se había presentado una arquitectura general propuesta (ver Figura 13). A continuación (en la Figura 21) se muestra la arquitectura adaptada al ejemplo de aplicación para permitir que un médico especialista pueda atender a un paciente con discapacidad transitoria de rodilla que se encuentra geográficamente distantes.

El servicio de “Máquina de rehabilitación física” mostrado en la Figura 13, ahora se denomina “Servicio máquina de rodilla” ya que será el caso a estudiar.

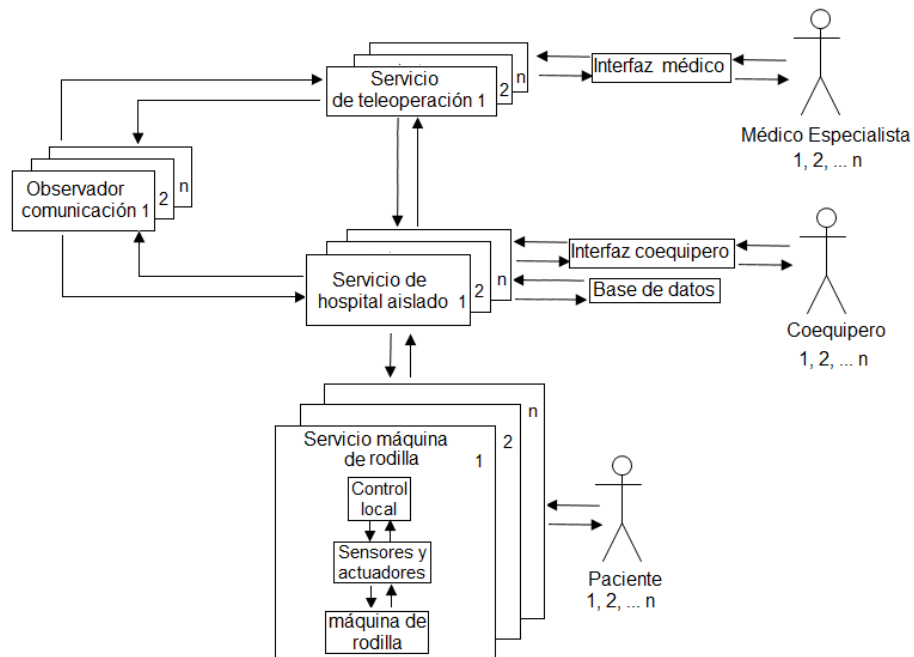


Figura 21 – Arquitectura del ejemplo de aplicación
Fuente: elaboración propia

Inicialmente, tanto el médico, el coequipero y el paciente se encuentran en un estado desconectado y aún no han ingresado al sistema, por tal motivo, lo primero que ocurre en la red, es el ingreso al sistema de los tres actores principales de la arquitectura. El coequipero debe iniciar sesión y es quien ingresa los datos del paciente. Después, el coequipero debe conectar el paciente a la máquina y corroborar que todo esté funcionando correctamente.

Luego, el coequipero genera una solicitud de teleoperación buscando por médicos disponibles y se queda a la espera. Es aquí, donde el médico, una vez ya ha iniciado sesión, genera una instrucción denominada “Buscar pacientes”. Cuando el medico está buscando pacientes y el coequipero ha generado una solicitud de teleoperación, es posible generar la conexión entre los Servicios de Teleoperación y el Servicio de Hospital Aislado (ver Figura 21).

Después, el médico debe solicitar tanto la historia clínica así como la evolución del paciente y también realizar un proceso de “reserva de maquina”. Esto es para que el medico conozca el estado clínico del paciente y también para saber si ya se han realizado sesiones de fisioterapia por telemedicina. Una vez el medico conozca esta información, se procede a realizar el proceso de fisioterapia al paciente geográficamente distante.

Después de realizar el proceso de fisioterapia del paciente, el medico tiene la libertad de escoger si se continúa con otra fase de la rehabilitación o si por el contrario se da por terminada el protocolo de rehabilitación. Si se escoge terminar la terapia, el médico debe actualizar la historia clínica del paciente para dar por terminado todo el proceso.

En este proceso hay que hacer una aclaración. Para fines de este texto, se entiende como protocolo de rehabilitación a un conjunto de instrucciones que permiten realizar la fisioterapia al paciente (que para nuestro caso de estudio se trata de los movimientos de flexión y extensión de rodilla). Estos protocolos pueden contener fases de rehabilitación. Para entender mejor esto, es importante observar la Tabla 3 y Tabla 4.

Fase de Rehabilitación	<i>Extensión[°]</i>	<i>Flexión [°]</i>	<i>Velocidad[°/min]</i>	<i>Tiempo entre cambio de movimiento [s]</i>	<i>Tiempo de terapia [min]</i>
	0	30	30	2	30

Tabla 3 – Ejemplo fase de rehabilitación

Protocolo de Rehabilitación	<i>Extensión[°]</i>	<i>Flexión [°]</i>	<i>Velocidad[°/min]</i>	<i>Tiempo entre cambio de movimiento [s]</i>	<i>Tiempo de terapia [min]</i>
	0	30	30	2	30
	10	40	50	3	20

Tabla 4 – Ejemplo Protocolo de rehabilitación

Por otro lado, se consideró como base de datos a un registro de las historias clínicas y evoluciones del paciente. Aquí, hay que hacer claridad entre estos dos aspectos:

- Como historia clínica, se entiende toda la información que el médico necesita para diagnosticar y tratar al paciente. Aquí, se guarda toda la información que el medico considera importante para poder entregar su concepto profesional teniendo como objetivo la recuperación del paciente.
- Por su parte, la evolución será un espacio de memoria en el cual se almacenan los datos referentes a las terapias que se han realizado por medio de telemedicina al paciente.

4.3. Modelamiento del sistema en Redes de Petri Coloreadas

Partiendo de la Figura 21, se realizó el modelado en Redes de Petri Coloreadas del sistema propuesto. A continuación se muestra la red general de dicha arquitectura. Es importante notar que los servicios definidos, así como el observador de comunicación y la base de datos se encuentran representados dentro de macro-transiciones haciendo el uso de jerarquías, lo cual es una ventaja clave de las Redes de Petri Coloreadas frente a las Redes de Petri Ordinarias.

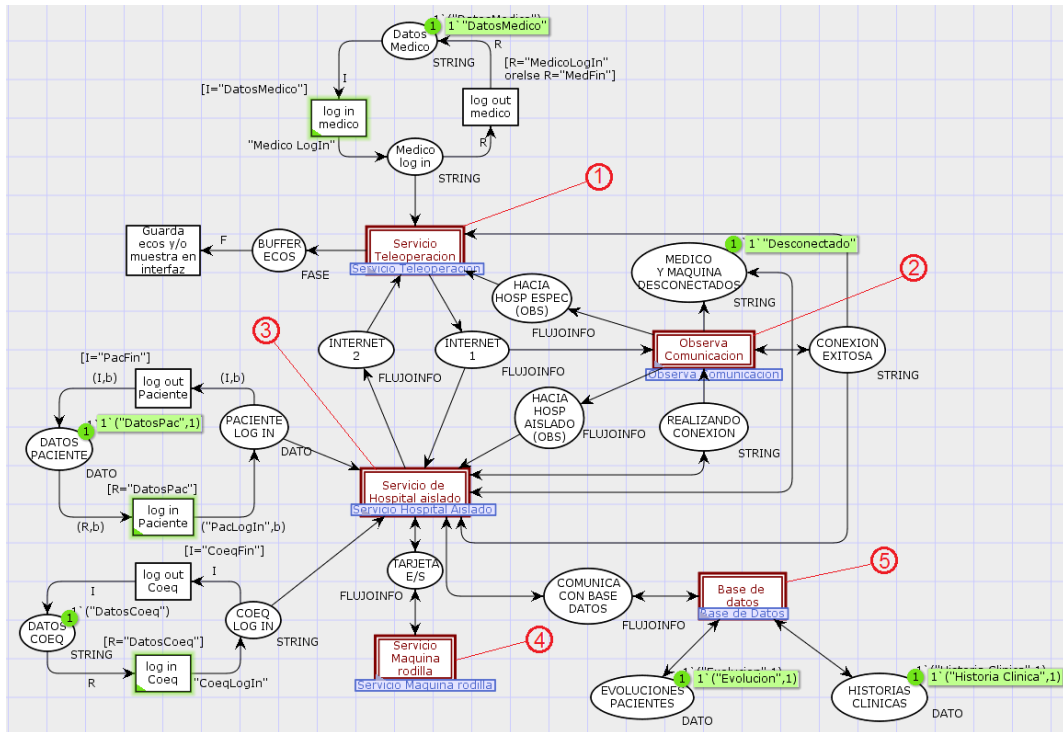
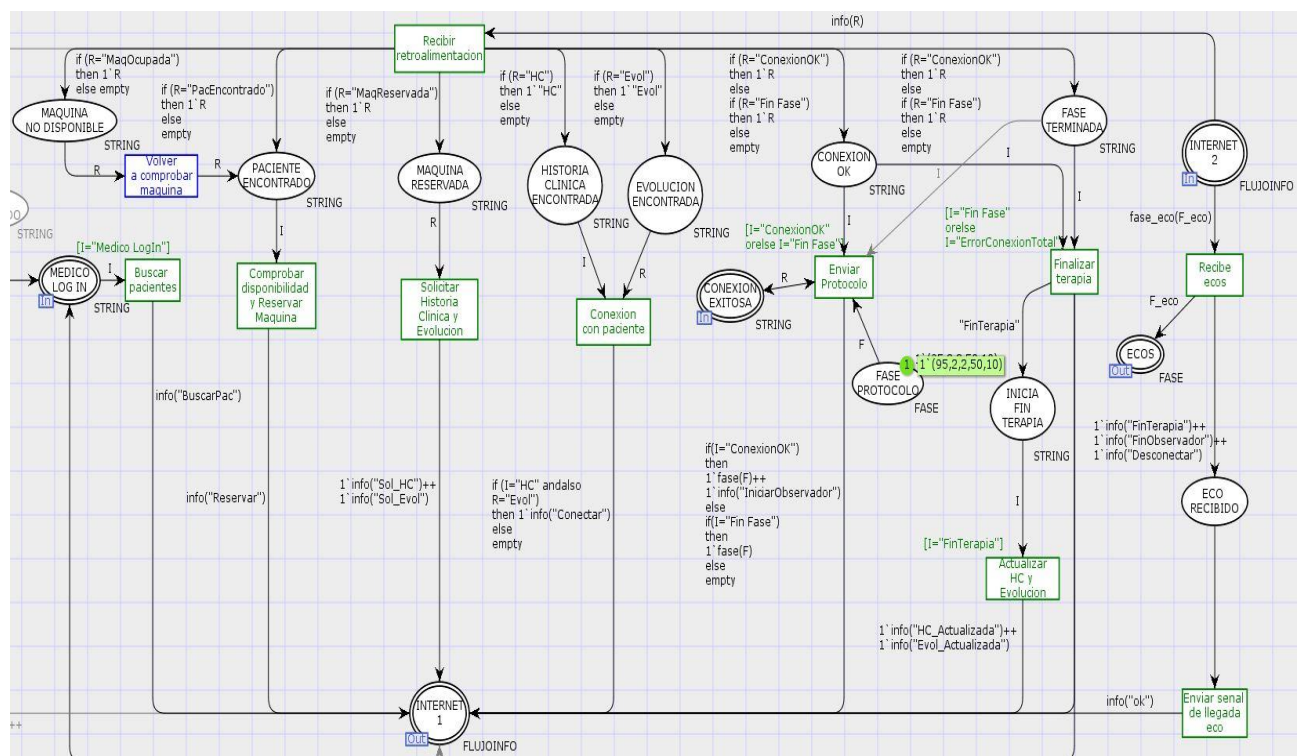


Figura 22 – Red general
Fuente: elaboración propia

Un aspecto importante por remarcar en la Figura 22 es que los servicios que se comunican a través de internet son los servicios que se denominaron Servicio de Teleoperación y Servicio de Hospital Aislado (numerales 1 y 3 de la Figura 22 respectivamente). Para comunicarse entre ellos, se utilizaron dos lugares llamados “Internet 1” e “Internet 2”. Estos lugares funcionan como entrada y salida de información. Es claro que en general, dichos lugares solamente representan un canal de comunicación (que en este caso es el internet). También

Por su parte, el médico será quien este en contacto directo con el Servicio de Teleoperación el cuyo modelo propuesto se muestra a continuación:



En la Figura 23 se puede observar el comportamiento general del Servicio de Teleoperación, así como las diferentes operaciones que realiza este servicio. El Servicio de Teleoperación se comunica con el Servicio de Hospital Aislado que se muestra a continuación:

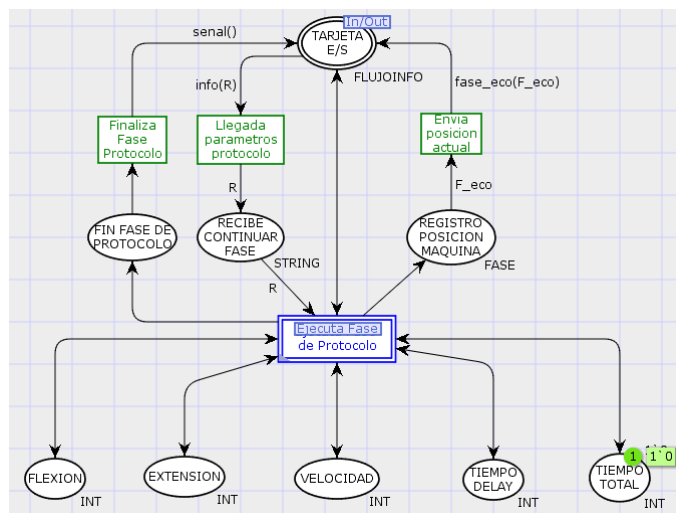


Figura 25 – Servicio de máquina de rodilla
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 25, los estados que puede contener este servicio corresponden a los datos que el médico debe proporcionar para realizar la terapia: grados de flexión, grados en extensión, velocidad de movimiento, tiempo entre cambio de movimiento (*de/lay*) y tiempo total de terapia.

Por otro lado, se consideró una forma muy general, las posibles fallas de comunicación que se pueden presentar. Para tal motivo, fue necesario de una subred que se denominó “Observador de Comunicación” (mostrado en el numeral 2 de la Figura 22). Este observador se modeló tal y como se muestra a continuación:

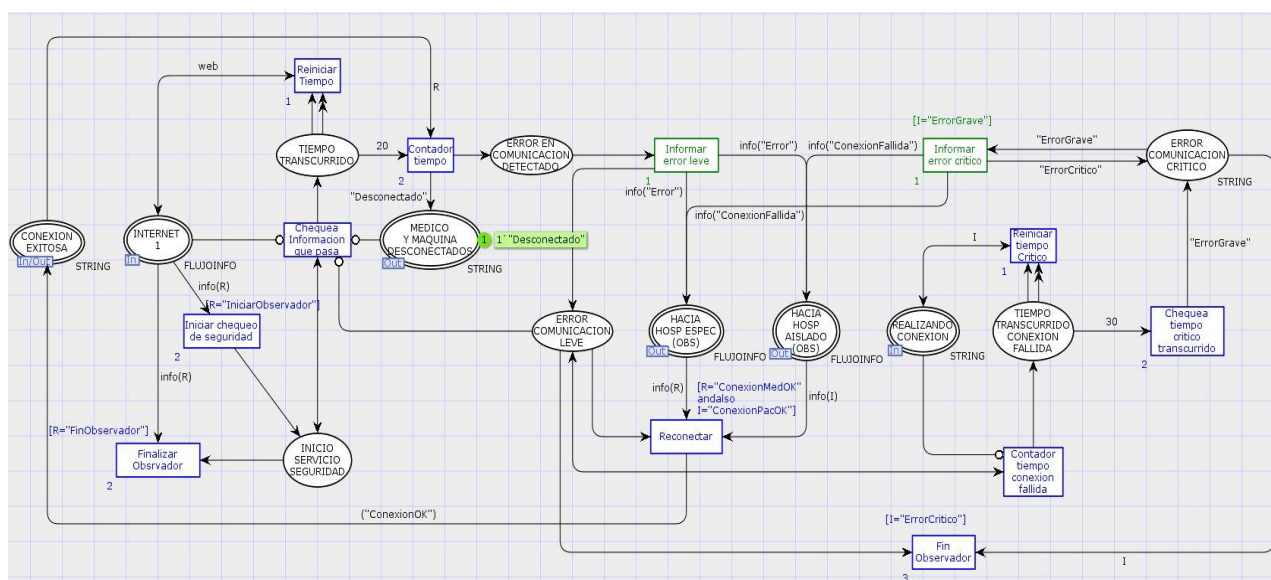


Figura 26 – Observador de comunicación
Fuente: elaboración propia

Este observador tiene la capacidad de comprobar los mensajes que pasan a través de los lugares designados para la comunicación entre servicios. Si han pasado 20 segundos durante el proceso de terapia y no ha habido flujo de información entre principalmente los dos servicios fundamentales (Servicio de Teleoperación y Servicio de Hospital Aislado), el observador de comunicación, hace que la arquitectura entre en un estado de reconexión.

Si no se puede reconectar, al cabo de 30 segundos, la sesión se da por terminada y se finaliza la terapia de forma dispersa continuando el control de forma local. Así, la máquina seguirá en funcionamiento hasta terminar con la última fase de rehabilitación que había sido asignada. El coequipero deberá por lo tanto actualizar por su cuenta la historia clínica e informar que existió una falla en la comunicación.

Uno de los retos de este trabajo, fue acoplar los tres servicios que componen la arquitectura. Para esto, se hizo uso de jerarquías, que permiten el modelado de cada uno de los servicios por separado, para luego establecer la forma en que se van a comunicar entre ellos. Así, se hizo uso de varias transiciones u operaciones que ejecutan un proceso al interior o al exterior del servicio. A continuación se muestra un resumen de las transiciones (u operaciones) que cada uno de los servicios realiza durante el proceso de fisioterapia.

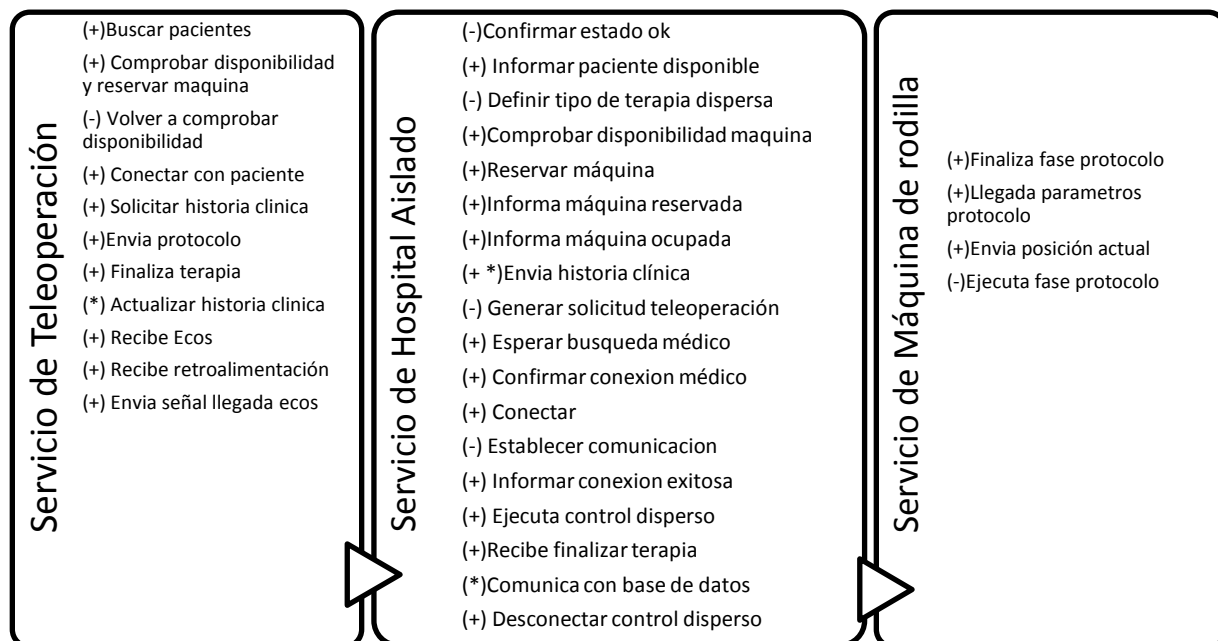


Figura 27 – Resumen conexiones entre servicios
Fuente: elaboración propia

Las convenciones utilizadas en la Figura 27 se muestran a continuación:

- (+) Cuando la transición se comunica con otro servicio
- (-) Cuando la transición se comunica al interior del servicio
- (*) Cuando la transición se comunica con la base de datos

4.4. Implementación

Uno de los objetivos del presente trabajo era realizar el modelado en Redes de Petri del sistema mostrado, con el objetivo de plantear la arquitectura mediante un enfoque de orientación a servicios. Fue así, como en la sección anterior se realizó el modelado del sistema de teleoperación de máquinas de rehabilitación para articulación de rodilla. Las especificaciones generadas con el uso del modelo fueron implementadas. Como resultado se tuvo acceso a la operación de la máquina de rodilla mostrada en la Figura 20 mediante comandos generados en una localización distante y enviados vía internet.

Para tal fin, se implementaron *web service* utilizando el ambiente de Visual Studio 2010 y C# como lenguaje de programación. Adicionalmente, se desarrollaron dos interfaces de usuario. Una para el médico especialista y otra para el coequipero.

Por su parte, la interfaz del coequipero, se realizó teniendo en cuenta un trabajo anterior, [53], que realizó el control local de dicha máquina. De esta forma, la interfaz se adaptó de manera conveniente para que no solo funcione para el control local, sino que también funcione de forma dispersa y pueda consumir los servicios web necesarios para poder realizar la terapia de forma remota.

4.4.1. Interfaz de usuario para médico especialista

A continuación se muestra la interfaz que se desarrolló para que el medico pueda realizar una terapia:

Figura 28 – Interfaz general para el médico especialista
Fuente: elaboración propia

En la Figura 28, esta interface se diseñó utilizando los principios de usabilidad en relación a agrupación de información con similar contexto. Así, en la parte izquierda corresponde al proceso de control de la máquina de rodilla y la parte derecha corresponde únicamente al proceso de actualización de la historia clínica y la evolución del paciente. Estas dos partes del procedimiento se explican a continuación.

Figura 29 – Etapa de control de la interfaz médico
Fuente: elaboración propia

En la Figura 29, se muestran los componentes de la interfaz desarrollada. En la parte A, se encuentran los botones “Buscar”, “Conectar” y “Desconectar”, los cuales se usan para los procesos de encontrar pacientes, inicio terapia y el finalizar terapia respectivamente. Con el botón “Buscar”, el medico realiza un proceso de búsqueda de pacientes que estén a la espera de un proceso de terapia o que hayan solicitado dicho servicio. Con el botón “Conectar” se realiza la conexión del médico especialista con el dispositivo de asistencia médica (máquina de rodilla). Con el botón “Desconectar”, se finaliza la terapia de tal manera que el coequipero sea informado que el medico dio por finalizada el proceso de terapia. También se encuentra una salida visual que informa el “Estado” en el proceso de búsqueda, conexión y desconexión con el paciente.

Por su parte, en C, se muestran ayudas visuales de “Estado de Historia Clínica” y “Estado Maquina”. Esto se relaciona mucho con los botones mostrados en D, ya que con el botón llamado “Solicitar Historia” se tiene acceso a la información correspondiente al paciente que está a la espera del proceso de tele-fisioterapia. La información de la historia clínica del paciente se muestra en B. Si el coequipero no ha enviado la información correspondiente, en “Estado de Historia Clínica”, se informara al médico lo que ha ocurrido.

Por otro lado, el botón llamado “Comprobar disp. Maquina”, lo que hace es comprobar que la máquina de rodilla se encuentra disponible para realizar la terapia y se lo hace saber al médico mediante “Estado Maquina”. Esto se hace debido a que como se está utilizando *web services*, un servicio puede ser llamado por cualquier número de usuarios, pero solo podrá ser usado el servicio por aquel médico que haya realizado el chequeo de disponibilidad. Si la maquina está disponible, el médico, mediante el botón “Comprobar disp. Maquina” también realiza un proceso de reservar la máquina para ser utilizada en el proceso de terapia.

También, en E y F, se encuentran componentes principales para que el medico pueda generar los telecomandos que crea convenientes para controlar la máquina. Aquí se inicia con la “actualización de parámetros” que es necesaria para preparar la máquina para el proceso de terapia. Después de eso, se puede proceder con la parte G, donde se da las instrucciones de “Inicio”, “Pausa” y “Reset”. Además, se retroalimenta al médico mediante los valores de “Tiempo de Terapia” y “Angulo Actual”. También en “Estado Terapia”, el medico recibe información acerca del proceso y sabe si hubo algún error en el proceso o si se está llevando a cabo de forma correcta.

Ahora, en Figura 30, se muestra el panel desarrollado para el manejo de las historias clínicas por parte del médico especialista. En H, se encuentran los datos correspondientes al paciente y de la terapia que se llevó a cabo. Hay un espacio para que el medico pueda escribir “Observaciones” mostrado en I, que es en donde se puede recetar medicamentos, informar acerca de la recuperación del paciente o realizar una remisión en caso de necesitarse.

Figura 30 – Manejo base de datos de interfaz médico
Fuente: elaboración propia

Por último, en J es donde el medico puede guardar los datos de la terapia llevada a cabo. Es aquí donde se actualiza la respectiva evolución e historia clínica del paciente. El médico en este punto solo puede guardar, no le es posible ni borrar ni editar otra información.

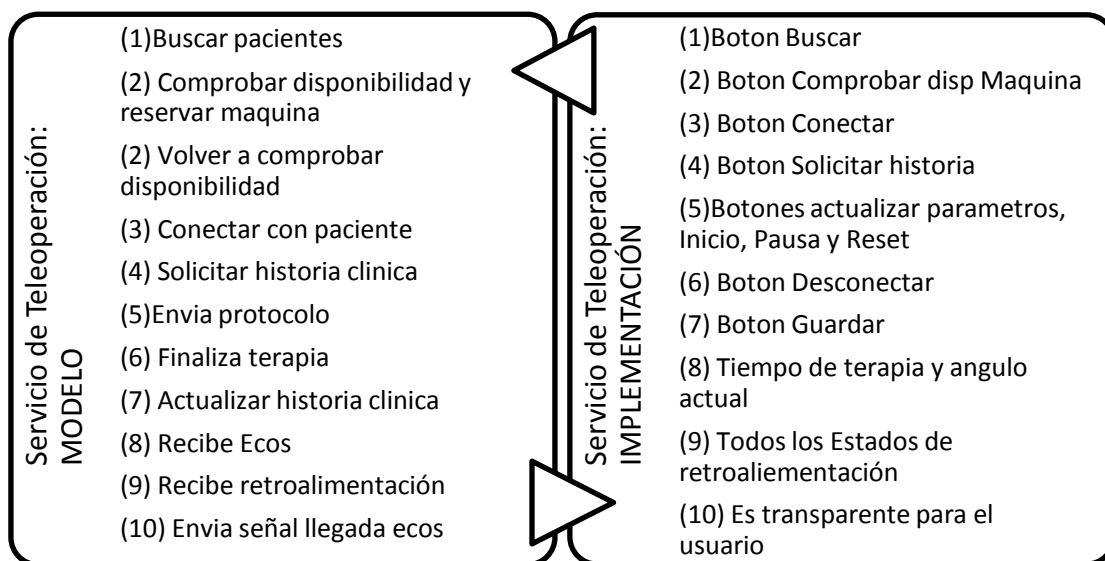


Figura 31 – Comparación servicio de teleoperación modelo vs implementación
Fuente: elaboración propia

La Figura 31 muestra una comparación entre las operaciones que se modelaron del servicio de teleoperación contra las operaciones que se realizan por medio de la interfaz de usuario desarrollada. En general, lo que se puede apreciar (de esta última Figura) es que las operaciones definidas mediante el modelo del Servicio de Teleoperación, fueron las mismas que se desarrollaron para la implementación.

4.4.2. Interfaz de usuario para coequipero

La interfaz de usuario que debe manejar el coequipero es la siguiente:

The screenshot shows a software interface for a cooperator. At the top, there are buttons: 'Guardar', 'Actualizar', 'Borrar', and 'Telemedicina'. Below these, there's a section 'Para envío Historia Clínica' with a text input for 'Número de identidad paciente' and buttons 'Buscar' and 'Enviar Historia'. To the right, there's a 'Realizar confirmación' section with two radio buttons: 'Activar para confirmar disponibilidad maquina' and 'Activar para confirmar paciente correctamente conectado a la maquina'. On the right side, there's a control panel with 'Control Local' selected, buttons 'Conectar Maquina a computador' and 'Desconectar Maquina de Computador', and a section 'Se esta trabajando de forma local' with a radio button 'Activar para control por internet: Máquina disponible'. Below this, there's a 'Parámetros' section with inputs for 'Flexión', 'Extensión', 'Velocidad', 'Tiempo', and 'Delay', and an 'Actualizar parámetros' button. To the right of this is a 'Parámetros actuales' section with a large display area and buttons 'Inicio/Pausa' and 'Reset'. At the bottom, there's a table with columns: 'Id', 'Nombre', 'Apellido', 'Edad', 'NIdentidad', 'Fecha', 'Flexion', 'Extension', and 'Vel'. The table contains five rows of patient data.

	Id	Nombre	Apellido	Edad	NIdentidad	Fecha	Flexion	Extension	Vel
▶	366	Ivan	Ruiz	25	1085285376	13/10/2015 12:0...	40	0	90
	675	Maria	Valencia	28	1130635268	13/10/2015 12:0...	40	0	90
	527	Pedro	Hernandez	34	90090764186	12/10/2015 12:0...	40	0	90
	88	Juan	Rodriguez	43	1085269799	11/10/2013 12:0...	10	65	88
	250	Juan	Narvaez	38	1890236752	03/11/2015 12:0...	60	20	95

Figura 32 – Interfaz general coequipero

Fuente: Basado en [53]

La interfaz mostrada en la Figura 32, permite tanto el control local como el control distribuido y disperso de la máquina de rodilla. En la parte A, se realiza una conexión de la maquina con el computador que realizará el control correspondiente (esto es necesario tanto para control local como para el control disperso). En la parte B, hay una opción que es donde se escoge si la terapia va a ser por internet o si se va a realizar de forma local. Las partes E, F y G, son importantes para realizar la terapia de forma local. Sin embargo, cuando se realiza la terapia de forma dispersa por internet dichos campos quedan sin utilidad.

La parte D, es importante porque es aquí donde el coequipero le envía la historia clínica al médico especialista para que este último pueda escoger la terapia que considere adecuada. En C, solo se realizan unos chequeos antes de iniciar la terapia por internet. Toman cierta importancia debido a que el médico no va a tener un video acerca de la terapia y no va a poder observar lo que está pasando. Es por esta razón, que la retroalimentación de ciertos estados del proceso resultan de gran utilidad para el médico especialista y para el proceso de terapia. La parte I, muestra unas pestañas las cuales sirven para poder manejar de mejor manera las historias clínicas de los pacientes. Desde aquí se puede guardar, borrar y editar, cosa que no puede hacerlo el médico especialista por internet. El resultado del manejo de dichas historias clínicas, se puede observar en la sección H.

A continuación se presenta una comparación entre las operaciones que se modelaron del servicio de hospital aislado contra las operaciones que se realizan por medio de la interfaz de usuario desarrollada.

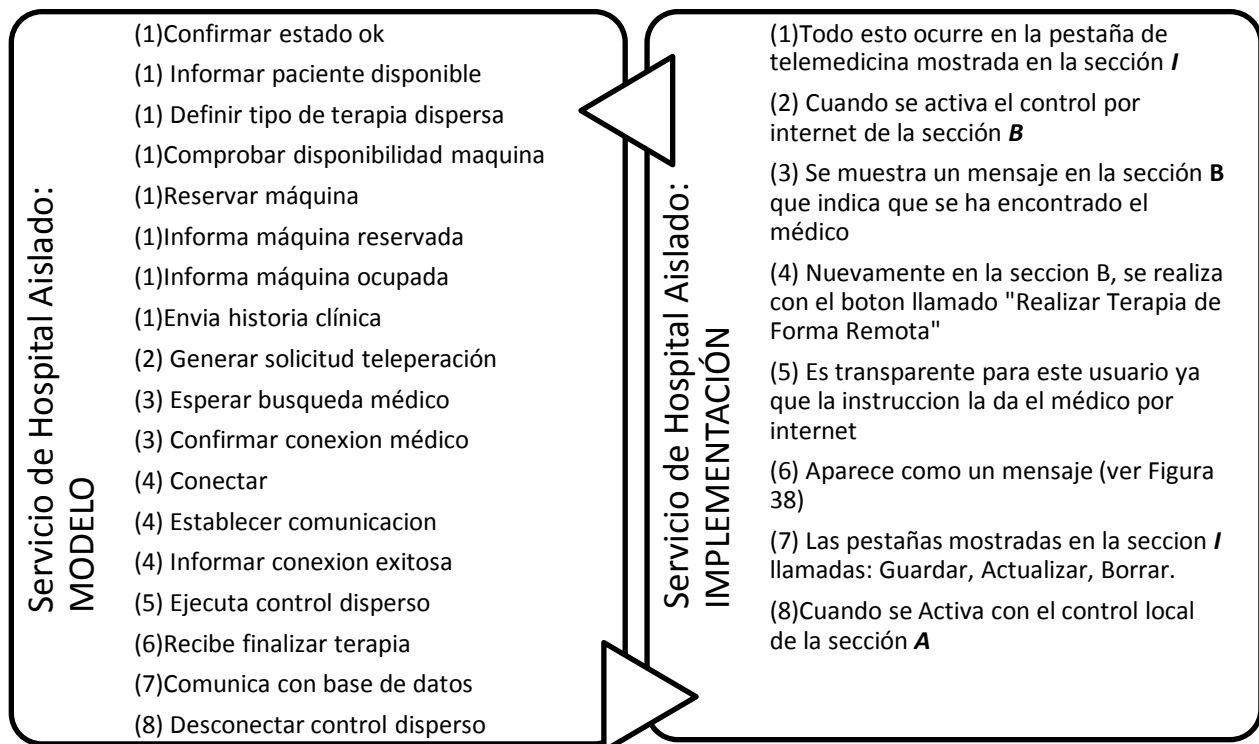


Figura 33 - Comparación servicio de hospital aislado modelo vs implementación
Fuente: elaboración propia

En general, lo que se puede apreciar de la Figura 33, es que las operaciones definidas mediante el modelo del Servicio de hospital aislado, fueron acordes con las desarrolladas para la implementación.

Resumen del capítulo

Al iniciar este capítulo, se dio un vistazo general al estado actual de la máquina para articulación de rodilla que fue tomado como ejemplo de aplicación. De acuerdo a esto, se procedió a realizar el modelamiento en Redes de Petri Coloreadas de la arquitectura planteada para el ejemplo de aplicación dado. Finalmente se mostró la implementación del sistema como un resultado del modelamiento realizado. En este capítulo se cumplió con el segundo objetivo específico planteado. Mediante el modelado del sistema en Redes de Petri, se especificaron los diferentes sistemas de comunicación y coordinación de los diferentes servicios que se habían definido en el Capítulo 3. También, se dio cumplimiento al penúltimo objetivo específico realizando la implementación de la arquitectura propuesta mediante un enfoque de orientación a servicios.

Capítulo 5. Resultados, conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo, inicialmente se muestran algunos resultados de la arquitectura comparando la arquitectura obtenida con los principios de una arquitectura SOA .Luego se mostrara las comparaciones entre el modelado del sistema y la implementación del mismo. Para ello se presentan dos escenarios de validación que permiten realizar comparaciones entre el modelo y el funcionamiento real. Por último se realizarán las conclusiones pertinentes y los trabajos futuros que continuarían con el estudio de la tele-rehabilitación, tele-fisioterapia y telemedicina.

5.1. Resultados

Uno de los objetivos relevantes del presente trabajo es obtener una arquitectura con orientación a servicios. Para tal fin, se deben cumplir con ciertos principios que rigen una arquitectura SOA. En la siguiente tabla se muestra una verificación de algunas características o principios que debe cumplir una arquitectura SOA comparando si la arquitectura obtenida mediante el modelado en Redes de Petri se puede catalogar como una arquitectura orientada a servicios.

Principio de SOA	¿Cumple con este principio?	Factor verificable
Reusabilidad	Si	Como ejemplo de aplicación, se tomó una máquina de rehabilitación de rodilla. El modelo planteado permite acoplar otra máquina de uso fisioterapéutico y/o acoplarse a otro sistema
Interoperabilidad	Si	Existe un intercambio continuo de información entre los servicios y se utiliza constantemente esta información intercambiada
Composición	Si	En la arquitectura mostrada hay servicios que se comunican con otros servicios.
Auto-contenido	Si	Al usar jerarquías en las Redes de Petri se logró que cada servicio este encapsulado y sea independiente

Bajo Acoplamiento	Si	Cuando se realizó el modelo, se observó que los servicios se comunicaban entre sí a través de ciertas interfaces las cuales eran algo mínimo comparado con el todo
Servicios sin estado	Si	En el modelado, se pudo observar que los servicios, una vez consumidos, volvían al estado inicial

Tabla 5 – Comparación del modelado e implementación contra características de SOA

Lo que se puede observar de la Tabla 5, es que la arquitectura que se planteó en el desarrollo de este proyecto es una arquitectura SOA porque cumple con los principios mencionados en este documento.

5.2. Escenarios de validación

Se plantearon dos escenarios de validación. Uno cuando la terapia se lleva a cabo de forma exitosa, y el segundo considerando la ocurrencia de una falla en la comunicación. Estos dos escenarios se explicarán a continuación.

5.2.1. Funcionamiento correcto del sistema

Considerando las implicaciones éticas que traería realizar las pruebas del sistema con personas, se simuló la presencia de un paciente de 80 Kg utilizando pesos calibrados distribuidos de manera que representen la extremidad inferior en la máquina. En promedio, el peso del muslo de una persona con un índice de masa corporal dentro de los límites normales, equivale al 10% de su peso total, mientras que el peso de pantorrilla más pie equivale a un 6.1% [54]. Esto es, para una persona sana de 80kg: Peso muslo= 8kg y Peso pantorrilla más pie =4,88Kg. Ver Figura 34.



Figura 34 – Máquina con pesos calibrados
Fuente: elaboración propia

Para validar el comportamiento del sistema, se ingresaron los parámetros de funcionamiento en las interfaces de usuario y el funcionamiento de la maquina se evaluó mediante mediciones de consumo de corriente del motor en función del tiempo. Esto se realizó de dos formas: primero con la maquina sin peso, y segundo con la maquina con peso.

Para realizar dichas mediciones, se seleccionó como terapia estándar lo siguiente:

Flexión [°]	50
Extensión [°]	10
Velocidad [°/min]	95
Tiempo [min]	2
Delay [s]	2

Tabla 6 – Terapia estándar seleccionada

Utilizando los datos mostrados en la Tabla 6, se realizaron mediciones de corriente consumida por el motor vs el tiempo. Los datos se midieron cada 5 segundos en un total de 2 minutos de terapia. En total se realizaron 3 corridas para las dos condiciones (con peso y sin peso). A continuación se muestra una gráfica representativa obtenida en cada caso:

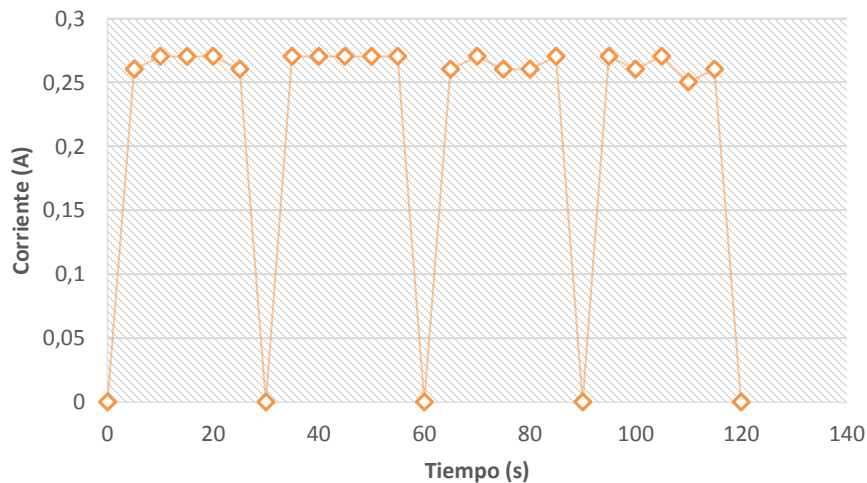


Figura 35 – Corriente vs tiempo maquina sin peso
Fuente: elaboración propia

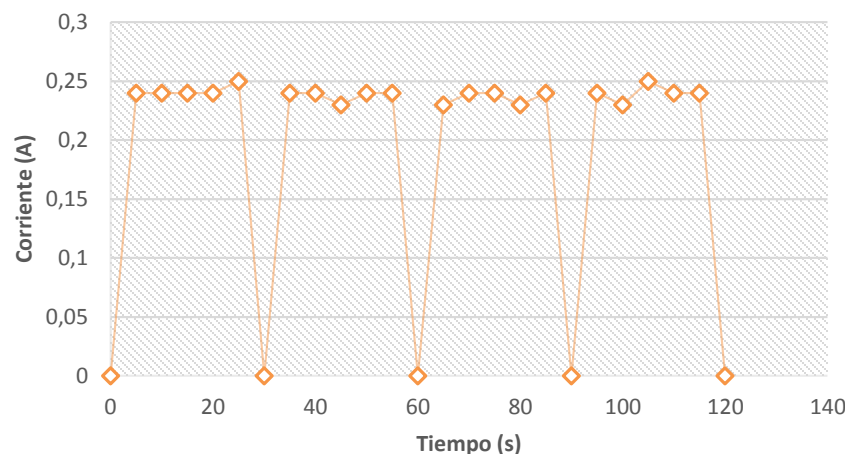


Figura 36 – Corriente vs tiempo maquina con peso equivalente a pierna de persona 80kg
Fuente: elaboración propia

En general, para todas las corridas se obtuvo un promedio de corriente de operación equivalente a 0,26 amperios cuando la maquina esta descargada y 0,24 amperios para la maquina cargada. Ambos casos registraron un valor de desviación estándar muy cercano a cero. En los puntos donde la gráfica llega a un valor de cero en corriente es cuando la maquina llega a las posiciones de flexión y extensión y por lo tanto se detiene para cambiar de dirección. El leve cambio en la corriente (entre maquina cargada y descargada) se debe posiblemente a la lubricación de la superficie de deslizamiento. Para realizar las pruebas, se lubricó la maquina pero al parecer el aceite se distribuyó de una mejor manera cuando se estaban tomando los datos correspondientes las corridas realizadas con peso en la máquina.

5.2.2. Falla en la comunicación del sistema

En general, una falla en la comunicación se puede presentar por varias razones. Por ejemplo, si no hay flujo eléctrico, es cierto que se apagan todos los elementos que dependan de la red electrica: Computadores y máquina. Sin embargo, este problema se puede sortear recomendando que para la instalación de los elementos que componen el sistema, estén conectados cada uno a una UPS para evitar la interrupción abrupta del proceso de terapia.

Sin embargo, el hecho de que el coequipero o el médico especialista se queden sin internet en un determinado estado de la terapia resulta en una falla en la comunicación. Cuando esto ocurre, lo que sucede es lo mismo que se planteó en las Redes de Petri cuando se explicó el observador de la comunicación (ver Figura 26). Dicho observador lo que hace es estar

chequeando que la información fluya. Si esto no ocurre en un periodo igual a 20 segundos, se detecta una falla en la comunicación y se accede a un proceso de reconexión. Si esta reconexión tarda más de 30 segundos, se da por terminada la terapia de forma remota y el coequipero pasa a terminar la terapia asignada de forma local.

En la implementación, se logró hacer lo mismo. Lo que se hace a nivel de implementación es que la interfaz del coequipero y del médico están chequeando permanentemente el estado de conexión. Si no está correcta la conexión, se intenta reconectar informándole tanto al médico como al coequipero que se está reconectado. De no poderse hacer esto, se finaliza el proceso de teleoperación, y la terapia pasa a realizarse de forma local.

A continuación se muestran los mensajes de retroalimentación para el médico (ver Figura 37) y para el coequipero (ver Figura 38) cuando se produce una desconexión total entre el médico y el coequipero.

TELE-REHABILITACIÓN UNIVERSIDAD DEL VALLE

 Estado: DESCONECTADO

Estado Historia Clínica: ---
Estado Maquina: ---

Flexión [°]
Extensión [°]
Velocidad [°/min]
Tiempo Total [min]
Delay [s]

Flexión [°]
Extensión [°]
Velocidad [°/min]
Tiempo Total [min]
Delay [s]

Tiempo Terapia Ángulo Actual [°]

Estado Terapia: ---

Figura 37 – Informe estado desconectado interfaz medico
Fuente: elaboración propia

	Id	Nombre	Apellido	Edad	NoIdentidad	Fecha	Flexion	Extension	Vel
▶	366	Ivan	Ruiz	25	1085285376	13/10/2015 12:0...	40	0	90
	675	Maria	Valencia	28	1130635268	13/10/2015 12:0...	40	0	90
	527	Pedro	Hernandez	34	90090764186	12/10/2015 12:0...	40	0	90
	88	Juan	Rodriguez	43	1085269799	11/10/2013 12:0...	10	65	88
	250	Juan	Narvaez	38	1890236752	03/11/2015 12:0...	60	20	95

Figura 38 – Informe de estado desconectado interfaz coequipero
Fuente: Basado en [53]

Con estos escenarios de validación planteados, se dio cumplimiento al último objetivo específico donde se validó el funcionamiento de una terapia normal simulando la presencia de un paciente mediante pesos calibrados (ver Figura 34) y así realizar mediciones de consumo de corriente del motor como factor verificable del funcionamiento. También, para dar cumplimiento al último objetivo específico, se comparó la implementación y el modelo en el escenario de una terapia con falla en la comunicación.

5.3. Conclusiones

De manera general, se planteó una arquitectura con orientación a servicios siguiendo los lineamientos de una arquitectura SOA para la teleoperación de máquinas de rehabilitación por fisioterapia. En general, lo que se quería era plantear una arquitectura que permitiera la teleoperación de dispositivos médicos enfocados a la rehabilitación física mediante teleoperación síncrona de máquinas de movimiento pasivo. Se encontró varias referencias de telemedicina en varias especialidades de la medicina, pero pocos trabajos son encontrados acerca de prestar un servicio de rehabilitación síncrono utilizando máquinas de movimiento pasivo como lo que se realizó en el presente trabajo. Una vez planteado el caso

más general, se procedió a acotar más el problema de tal forma que se tomó como caso de estudio la teleoperación de una máquina para rehabilitación de articulación de rodilla.

Después, se procedió a realizar el modelamiento en Redes de Petri Coloreadas del caso de estudio propuesto con el fin de estudiar la dinámica y comportamiento del sistema, así como también definir los servicios y también definir la forma en que estos servicios se comunican entre sí. De manera general se definieron 3 servicios: Servicio de Teleoperación, Servicio de hospital aislado y servicio de Máquina de rodilla. También se utilizó un observador de comunicación de una forma simple para tener una mayor seguridad en el proceso de fisioterapia e informar a los actores del sistema en caso de presentarse una desconexión inesperada.

Después de plantear el modelo, se procedió a realizar la implementación correspondiente. Para tal fin, se hizo uso de *web service* y se utilizó C# como lenguaje de programación. Se desarrollaron tanto los servicios a ser consumidos, así como las interfaces de usuario correspondientes al médico especialista y del coequipero, ya que ambos deben realizar ciertas operaciones en su respectiva interfaz para que la terapia pueda ser llevada de forma correcta al paciente. Se realizaron comparaciones entre las operaciones de los servicios del modelo contra las operaciones de los servicios de la implementación. Esto con el fin de mostrar que el modelo fue una pieza clave en el desarrollo de la implementación.

Por último y como escenarios de validación, se propuso dos. El primero que corresponde al adecuado funcionamiento del sistema donde el factor verificable fueron mediciones de corriente realizadas y el segundo que corresponde a la situación en el que se pierde la conexión y el observador de comunicaciones hace que el control pase de ser distribuido a ser local.

5.4. Recomendaciones y trabajos futuros

Como trabajo futuro queda, probar el sistema con varias máquinas, esto es: varios médicos, varios pacientes y varios coequiperos. Al estar utilizando *web service* para la implementación y haber modelado la arquitectura de forma modular, el sistema se supone que es escalable. Sin embargo esto no se pudo comprobar a manera de implementación ya que no se contaba con más máquinas de movimiento pasivo para realizar dicha prueba. A la fecha, el laboratorio de Mecatrónica de la escuela de Ingeniería Mecánica solo cuenta con una

máquina de movimiento pasivo para uso fisioterapéutico y por lo tanto no se pudo hacer pruebas de escalabilidad del sistema.

Al realizar la implementación de la arquitectura propuesta, es necesario saber que el paciente, no conoce la información del médico que lo atiende. Para una segunda versión, sería importante incluir un módulo que permita al paciente conocer al médico con el fin de que este último no quede en anonimato frente al paciente. Este es uno de los retos de telemedicina que no se tuvo en cuenta en el desarrollo del presente proyecto.

También, quedaría como trabajo futuro, analizar la posibilidad de la utilización de una cámara para que el medico pueda monitorear la terapia por medio de un video. No se realizó esto en el presente trabajo ya que se supuso que los lugares en los cuales este dispositivo sea implementado, serán lugares de difícil acceso con un limitado ancho de banda, lo cual dificultaría el uso de cámaras y su respectiva transmisión de video por internet. Sin embargo es una posibilidad que habría que estudiarse con más detalle.

Este trabajo abre las puertas a distintos estudios que van desde la construcción de más máquinas de movimiento pasivo, así como la integración de la arquitectura planteada al servicio de salud Colombiano, para que en el futuro se logre que los hospitales implementen esta tecnología para ampliar su cobertura en salud.

Bibliografía

- [1] E. Rodríguez, «Telesalud en Colombia,» Ministerio de la protección social, 2012. [En línea]. Available: <http://www.acreditacionensalud.org.co/catalogo/docs/Revista%20Normas%20y%20Calidad%20N%C2%B0%2090.pdf>. [Último acceso: 15 febrero 2013].
- [2] A. Lozano y E. Romero, «Telemedicina y telerradiología. La experiencia en la Universidad Nacional,» *Revista Colombiana de Radiología*, pp. 2435 - 2439, 2008.
- [3] M. Ortúzar, «Igualdad de acceso a la telesanidad en zonas rurales y aisladas: propuesta de un marco ético normativo integral de acceso y distribución,» *Revista Latinoamericana de Bioética*, pp. 76-93, vol 9., 2009.
- [4] A. Kopec y G. Rodríguez, «Aplicaciones de telecomunicaciones en salud en la subregion Andina,» Organismo Andino de Salud-Convenio Hipólito Unzué, Bogotá DC, 2006.
- [5] Telesalud Universidad de Caldas, «Centro de Innovación en e.salud,» Telesalud Caldas, 2010. [En línea]. Available: <http://telesalud.ucaldas.edu.co/telesalud/>. [Último acceso: 20 febrero 2013].
- [6] G. Observatory for eHealth, Telemedicine Opportunities and Developments in Member States, Switzerland: World Health Organization, 2010.
- [7] RUTE, «Em benefício da integração da comunidade de telemedicina,» Rede Universitária de Telmedicina, 2013. [En línea]. Available: <http://rute.rnp.br/>. [Último acceso: 16 Septiembre 2013].
- [8] Governo Federal Brasil, «Telessaúde Brasil Redes,» Ministerio de Saúde, 2013. [En línea]. Available: <http://www.telessaudebrasil.org.br/>. [Último acceso: 16 Septiembre 2013].
- [9] L. Salamanca, «Evaluación de la calidad en la atención en los servicios de fisioterapia, fonoaudiología, terapia respiratoria y nutrición en las instituciones de I, II y III de complejidad en la zona centro del departamento de caldas,» de *Foro interno de Investigaciones: Experiencias en investigación formativa*, Manizales, 2000.

- [10] DANE, «Censo general 2005,» DANE, 2005. [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-registros-vitales/censos/censo-2005>. [Último acceso: Mayo 20 2013].
- [11] J. Gómez, Discapacidad en Colombia: reto para la inclusión del capital humano, Bogotá: Fundación Saldarriaga Concha, 2010.
- [12] Alcaldía Mayor de Bogotá, «LEY 1346 DE 2009,» Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2009. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37150>. [Último acceso: 19 Febrero 2013].
- [13] EL TIEMPO, «Clasificación de los Hospitales,» EL TIEMPO Casa Editorial., 26 Julio 1997. [En línea]. Available: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-627858>. [Último acceso: 15 Mayo 2014].
- [14] Alcaldía Mayor de Bogotá, «LEY 10 DE 1990,» Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 1990. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=3421>. [Último acceso: 2014 Mayo 15].
- [15] S. Candela, C. García, A. Quesada, F. Santana y J. Santos, Fundamentos de sistemas operativos: teoría y ejercicios resueltos, Madrid, España: Thomson, 2007.
- [16] Universidad de Salamanca, «Herramientas de comunicación (sincrónica y asincrónica),» Grupo de Investigacion en Interaccion y eLearning, [En línea]. Available: http://antia.fis.usal.es/sharedir/TOL/herramientasTutoria/herramientas_de_comunicacin_sincrnica_y_asincrnica.html. [Último acceso: 4 Junio 2015].
- [17] Microsoft Corporation, La arquitectura orientada a servicios (SOA) de Microsoft aplicada al mundo real, Estados Unidos, 2006.
- [18] M. Josuttis, SOA in Practice the Art of Distributed System Design, United States: O'Reilly, 2007.
- [19] E. Cerant, Web Services Essentials Distributed Applications with XML-RPC, SOAP, UDDI & WSDL, O'Reilly, 2002.

- [20] P. Heinzelmann, N. Lugn y J. Kyedar, «Telemedicine in the future,» *Journal of Telemedicine and Telecare*, pp. 384 - 390, Vol 11., 2005.
- [21] I. Farkhatdinov y J. Ryu, «Teleoperation of Multi-Robot and Multi-Property Systems,» *The IEEE International Conference on Industrial informatics*, pp. 1453 - 1458, 2008.
- [22] M. Habib, «Collaborative Teleoperation: desing, requeriments and development issues,» Nagoya, Japan, 2000.
- [23] K. Goldberg y D. Song, «Unsupervised scoring for scalable Internet – based collaborative teleoperation,» de *Proceedings of IEEE Int. conf. on Robotics & Automation*, New Orleans, USA, 2004.
- [24] M. Amoretti, S. Bottazi, S. Caselli y M. Reggiani, «Telerobotic systems design based on real-time CORBA,» *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, nº 22, pp. 183-201, 2005.
- [25] N. Ortega y B. Villaluenga, «Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente,» *Reporte de Trabajo de Investigación IOC-DT-P-2004-05*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [26] Secretaria Senado, «LEY 1419 DE 2010,» Senado de la Republica de Colombia, 2010. [En línea]. Available: www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc_ant/ley_1419_2010.htm. [Último acceso: 19 febrero 2013].
- [27] MinSalud República de Colombia, «Ministerio de Salud y Protección Social,» 2014 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.minsalud.gov.co/>. [Último acceso: 16 Octubre 2014].
- [28] Ministerio de Justicia Patronato de Liberados, «Discapacidad,» Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2014. [En línea]. Available: <http://www.plb.gba.gov.ar/>. [Último acceso: 4 Marzo 2015].
- [29] Organización Mundial de la Salud, Comité de Expertos de la OMS en Rehabilitación Médica, Ginebra: Segundo Informe, 1969.
- [30] SaludCoop, «Telecomunicaciones al Servicio de la Salud,» SaludCoop EPS, 2012. [En línea]. Available: http://www.saludcoop.coop/index.php?option=com_content&view=

article&id=179&Itemid=204. [Último acceso: 21 febrero 2013].

- [31] N. Londoño, P. Castaño, D. Montoya y C. Ruiz, «Protocolo de telemedicina para la consulta psiquiátrica,» *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 3, nº 5, pp. 43-49, 2009.
- [32] D. Roncancio, J. Beltran, W. Cardenas, C. Montenegro y P. Gaona, «Prototipo de Telemedicina Móvil para Asistencia Médica Domiciliaria y Remota,» *Eighth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2010.
- [33] M. Callejas, A. Ruiz y R. Gutiérrez, «Métodos de Captura de Movimiento Biomecánico Enfocados en Telefisioterapia,» de *Intercambios de cuidado médico panamericanos*, Medellín (Colombia), 2013.
- [34] L. Yunda, L. Gomez, S. Rodriguez, R. Millán y M. Tobar, «Plataforma Web para un nuevo modelo de tele-rehabilitación, de base comunal, en areas rurales,» *Revista S&T*, vol. 9, nº 19, pp. 55-67, 2011.
- [35] M. Kifle, V. Mbarika y P. Datta, «Telemedicine in sub-Saharan Africa: The case of teleophthalmology and eye care in Ethiopia,» *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, pp. 1383–1393, Vol 57, 2006.
- [36] F. Campos, «El Programa Nacional de Telesalud en Brasil: un instrumento de apoyo a la atención primaria,» *Im Proc. Latin Am J Telehealth, Belo Horizonte*, 2009.
- [37] R. Alvez, «Aplicación de Telemedicina para la mejora de los sistemas de emergencias y diagnósticos clínicos,» *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, vol. 9, pp. 91-97, 2011.
- [38] T. Woong y H. Cheol, «A healthcare system as a service in the context of vital signs: Proposing a framework for realizing a model,» *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 64, pp. 1324-1332, 2012.
- [39] V. Siang, S. Zhuo, A. Phyo, M. Jayachandran, J. Biswas, L. Siew Yee y P. Yap, «Innovative Platform for TelePhysiotherapy,» de *10th International Conference on e-health Networking and Services*, Singapore, 2008.

- [40] P. Ferriol, M. Beatle, E. Arrivi, P. de Alarcon y M. Farreny, «TeleRHB: Telerehabilitación en personas mayores,» *XXVII CASEIB - Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, vol. 1, 2009.
- [41] D. Jung, K. Kim, G. Kim, D. Shim, M. Kim, B. Choi y D. Suh, «Biosignal Monitoring System for Mobile Telemedicine,» de *Enterprise networking and Computing in Healthcare Industry, 2005. HEALTHCOM 2005. Proceedings of 7th International Workshop* , 2005.
- [42] K. Kifayat, P. Fergus, S. Cooper y M. Merabti, «Body Area Networks for Movement Analysis in Physiotherapy Treatments,» de *IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, Liverpool, 2010.
- [43] H. Jung y T. Chen, «Implementation of CAMphysiotherapy device with a virtual spring,» *Computers in Biology and Medicine*, nº 38, p. 923–930, 2008.
- [44] D. Bradley, C. Acosta, M. Hawley, S. Brownsell, P. Enderby y P. Mawson, «NeXOS – The design, development and evaluation of a rehabilitation system for the lower limbs,» *Mechatronics*, vol. 19, p. 247–257, 2009.
- [45] D. Bradley, C. Acosta, M. Hawley, S. Brownsell, P. Enderby y P. Mawson, «Remote Rehabilitation - The NeXOS project: Lessons Learnt and Questions Raised,» de *IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Kyoto, Japon, 2009.
- [46] H. Chih-Jen, «Telemedicine information monitoring system,» de *10th International Conference on e-health Networking, Applications and Services*, Singapore, 2008.
- [47] T. Murata, «Petri nets: Properties, analysis and applications,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, nº 4, pp. 541-580, 1989.
- [48] J. García y F. Junquiera, «Towards Modular and Coordinated Manufacturing Systems Oriented to Services,» *Dyna (Medellín)*, pp. 201-210, 2010.
- [49] M. Nassar y J. Garcia, «Modelagem a Análise de uma Linha de Decapagem Por meio de Rede de Petri,» *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, pp. 22 - 27, 2008.

- [50] R. Zurawski y M. Zhou, «Petri nets and industrial application: A tutorial Industrial Electronics,» *IEEE Transactions*, vol. 41, nº 6, pp. 567-538, 1994.
- [51] K. Jensen y L. Kristensen, *Coloured Petri Nets Modelling and Validation of Concurrent Systems*, New York: Springer, 2009.
- [52] M. Zhou y F. DiCesare, *Petri net synthesis for discrete event control of manufacturing system*, New York: Springer Science+Business Media, 1993.
- [53] J. Camacho, *Sistema de Control Distribuido para Máquinas de Rehabilitación de Movimiento Pasivo Continuo de Rodilla*, Santiago de Cali: Universidad del Valle - Escuela de Ingenieria Electronica, 2014.
- [54] D. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, Ontairo,Canada: WILEY, 2009.
- [55] A. Casals, M. Frigola y J. Amat, «La robótica una valiosa herramienta de cirugía,» *Revista RIAI*, vol. 6, nº 1, pp. 5-19, 2009.