

INFORME FINAL
PROYECTO DE
INVESTIGACION
CONVOCATORIA
INTERNA UNIVALLE
2014-3
[CI]

Investigador Principal: Gladys Caicedo Delgado. PhD
Co-investigador: José Isidro García M. PhD

INDICE

Capítulo 1:	Informe General
Capítulo 2:	Soportes técnicos del diseño del sistema
Capítulo 3:	Resultados
Capítulo 4:	Conclusiones

CAPITULO 1. INFORME GENERAL

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

1.1. Datos Generales del Proyecto

<i>Código del proyecto:</i> 2804			
<i>Título del proyecto:</i> Diseño y construcción de una unidad de rehabilitación de hombro tele-operado que integra requerimientos de diseño interdisciplinarios.			
<i>Facultad o Instituto Académico:</i> Facultad de Ingenierías			
<i>Departamento o Escuela:</i> Escuela de Ingeniería Eléctrica y electrónica			
<i>Grupo (s) de investigación:</i> GRALTA			
<i>Investigadores ¹</i>	<i>Nombre</i>	<i>Tiempo asignado</i>	<i>Tiempo dedicado</i>
<i>Investigador Principal</i>	Nayiver Gladys Caicedo	10 horas/semana	5 horas/semana
<i>Co-investigadores</i>	José I. García Melo	5 horas/semana	5 horas/semana

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

1.2. Resumen Ejecutivo:

El diseño de ayudas tecnológicas tele-operadas para rehabilitación pasiva y activa, se consideran de gran importancia ya que reducen las barreras de acceso a la población en situación de vulnerabilidad geográfica. Esta propuesta se encuentra dentro del marco de la tele-medicina, la máquina de rehabilitación activa y pasiva para hombro se integra a una arquitectura con orientación a servicios dentro de un sistema de ayuda tecnológica tele-operada. En este trabajo se consideraron los protocolos clínicos de rehabilitación aplicables en la rehabilitación física tradicional y a esta arquitectura se le acoplo la máquina de rehabilitación de hombro que cumple con los protocolos de comunicación y con los dos módulos requeridos en esta articulación a rehabilitar, estos dos módulos son: 1. Los grados de libertad de la articulación y 2. Los rangos de movimiento anatómico que puede lograr la articulación, estos se requieren para desarrollar los módulos de: diseño mecánico, control, seguridad y comunicación entre la máquina de rehabilitación y el. Las etapas de diseño en todos los módulos se realizaron de manera estructurada utilizando herramientas de modelado para definir los requerimientos y sus especificaciones. En el diseño de la unidad de rehabilitación también se consideraron condiciones ergonómicas, antropométricas para la población colombiana. El diseño y la implementación fue validado mediante herramientas computacionales teniendo en cuenta los protocolos activos y pasivos vigentes, simulados de esta existentes en rehabilitación y los resultados de las simulaciones validaron el diseño. Adicionalmente, el diseño y la implementación consideran un sistema de seguridad que permite detectar eventualidades y una respuesta adecuada para garantizar el bienestar del paciente. También, se implementó un sistema de monitoreo para las variables más relevantes que permiten medir la evolución del paciente. Estas características novedosas benefician la atención en rehabilitación física a una población vulnerable, debido a la localización geográfica y condición socioeconómica.

1.3. Síntesis Técnico del Proyecto:

En Colombia, el porcentaje de población con limitaciones para movimiento del cuerpo, de manos, brazos y piernas esta alrededor del 21% a nivel nacional, en el Valle del Cauca esta cifra aumenta a un 35% [3]. Debido a este tipo de deficiencias las Actividades de la Vida Diaria (AVD) [16] en esta población se ve afectada en un 21% en la realización de las tareas generales y en un 31% presenta problemas para la movilidad [3]. Por este motivo las personas que sufren algún tipo de lesión ven afectada su calidad de vida, ya que no alcanzan su independencia en el desarrollo de tareas. En el censo del 2010 realizado por el DANE se encuentra que los métodos de mayor aceptación para los tratamientos de rehabilitación son: los medicamentos con un 58%, medicina física con un 16% y la fisioterapia con 22% [4]. Un tratamiento de rehabilitación física contempla tres procedimientos: desinflamación y disminución de dolor de la articulación, recuperación de la movilidad y fortalecimiento muscular. Este trabajo se centra en la recuperación de la movilidad y el fortalecimiento muscular, facilitando protocolos de rehabilitación de terapia activa y pasiva en pacientes con discapacidad transitoria. Así, se minimizan las barreras impuestas por el servicio médico centralizado en Colombia. Según [4], frecuentemente la calidad del servicio de rehabilitación se ve afectada negativamente por: falta de dinero para el desplazamiento (64%), falta de un acompañante (4%), lejanía del centro de atención (6%). Estos factores son los responsables del aumento en el riesgo de la vulnerabilidad geográfica de la población, y es por esto que el diseño de equipos para rehabilitación tele operados, es una necesidad sentida para disminuir estos efectos.

En la revisión del estado del arte para rehabilitación de hombro se encontraron varios sistemas o máquinas a nivel mundial [5]-[13]. Estas máquinas presentan desde propuestas conceptuales [11], hasta productos comerciales [5], [8], [9]. En [5] se presenta un dispositivo con características que brindan condiciones de seguridad al paciente. En [6] se presenta un sistema de rehabilitación de hombro a nivel de prototipo, en [7] se presenta un sistema que permite atender varias personas al mismo tiempo, pero de manera local. En [8] se describe una herramienta virtual que orienta al paciente en la ejecución de la terapia. En [9] el prototipo no considera condiciones de ergonomía, ni antropometría de los pacientes. En [10] se describe un dispositivo que permite el fortalecimiento muscular, pero no permite su trazabilidad en la rehabilitación. En [11] se presenta una propuesta de diseño conceptual, pero no se construye la máquina. En [12] se ilustra un exoesqueleto desarrollado para asegurar: la repetitividad de la terapia y soportar la carga del peso corporal, ya que está diseñado para personas con problemas en las capacidades motoras. Finalmente, en [13] se propone una máquina con característica de terapias para desarrollar en posición bípeda, situación que puede resultar poco conveniente para la aplicación de diferentes tipos de discapacidad.

Ninguna de las investigaciones consultadas, propone una solución integral a la atención de población en situación de vulnerabilidad geográfica, la cual debe

considerar aspectos de: tele-operación sincrónica, monitoreo permanente del paciente por parte del especialista, realización de terapias activas y pasivas, confort del paciente, antropometría para población colombiana, funcionabilidad, seguridad de los usuarios, trazabilidad del protocolo de rehabilitación, entre otras. La importancia de este trabajo radica, en considerar todos estos aspectos novedosos y necesarios que permite la tele-operación de una máquina de rehabilitación segura.

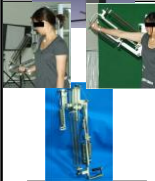
La complejidad biomecánica de la articulación de hombro, es debido a que el hombro es la articulación encargada de unir el tronco con el miembro superior, además en conjunto con el codo y la muñeca permiten el posicionamiento de la mano en el espacio. En el hombro se encuentran las articulaciones gleno-humeral, acromioclavicular, esternoclavicular y escapulotorácica, estas se encuentran integradas con las estructuras musculares y ligamentarias, las cuales permiten la movilidad de la articulación [1]. Esto implica considerar un diseño mecánico con tres grados de libertad, cuyos movimientos son: flexión – extensión (plano sagital), abducción y aducción (plano frontal) y rotación interna y externa (brazo en posición de aducción). Además, se consideró una arquitectura para que el sistema sea tele-operado.

De esta forma, se plantea la hipótesis que: si mediante un proceso de diseño interdisciplinar de un producto de rehabilitación tele-operado, es posible disminuir las barreras de acceso al servicio de salud especializado de rehabilitación para población en situación de discapacidad transitoria de hombro.

1. ESTADO DEL ARTE

En la **Tabla 1**, se presenta una matriz que ilustra los principales desarrollos en los equipos de la rehabilitación de miembros superiores a nivel mundial.

Tabla 1. Matriz de soluciones actuales

Imagen	Lugar de Desarrollo	Año	Modelo Máquina	Objetivo de la Máquina	Tipo de Terapia	Movimientos	Portabilidad	Teleoperación Local	Teleoperación Remota	Valoración	Conclusiones
	Japón	2012	Exoesqueleto de 4 GDL - Universidad de Saga	Asistencia en rehabilitación y actividades diarias en personas con debilidad física mayormente producida por el envejecimiento.	Terapia activa, pasiva y asistencia en los movimientos	Flexión, abducción, rotación interna-externa	Si pero Compleja	NO	NO	NO	Exoesqueletos desarrollados para asegurar la repetibilidad de la terapia y por otro lado la carga de peso corporal debido a que la mayoría están diseñados para personas con deshabilitación de las capacidades motoras NO MOVIMIENTOS VOLUNTARIOS (ACV, Hemiplejía, espasticidad, subluxación de hombro)
	USA, Washington	2009	CADEN-7	Uso humano y para teleoperación, amplificador de movimiento y terapia física miembros superiores.	Terapia activa y pasiva	Flexo-extensión, abducción-aducción, rotación interna-externa	NO	NO	NO	SI	EXOESQUELETOS indicados para personas en condición de discapacidad o para que el terapeuta pueda asistir varios pacientes a la vez
	Eslovenia y Suiza	2007	ARMin Robot	Pacientes con ACV o extremidades paralizadas	Terapia pasiva, terapia de juego y terapia de entrenamiento	Movimientos espaciales del hombro	NO	SI	NO	SI	Es un buen dispositivo en cuanto a las restricciones de seguridad que brinda al paciente
	Bogotá, Colombia	2007	Exoesqueleto de mecatrónica para rehabilitación motora	Reeducación del movimiento	Pasiva	Rotación interna-externa	NO	SI	SI	SI	no hay diseño unificado como sistema de rehabilitación
	Sudáfrica	2011	Portable Upper Limb Rehabilitative Exoskeleton	ACV, Hemiplejía, espasticidad, subluxación de hombro.	Pasiva	Flexo-extensión, abducción-aducción, rotación interna-externa	SI, pero pesada	NO	NO	SI	No está diseñado como producto, tamaño de actuadores excesivo
	Taiwán	2011	Design of an exoskeleton for strengthening the upper limb muscle for overextension injury prevention	Fortalecimiento muscular	Entrenamiento de los músculos	Flexión, abducción	NO	NO	NO	NO	indicado para fortalecimiento muscular, pero carece de valores y elementos para ser considerado como dispositivo médico de rehabilitación, no tiene en cuenta condiciones de pacientes lesionados
	Basado en el ARMin	2011	Armeo Power	Diseñado para personas con ACV, lesión cerebral u otros trastornos neurológicos que impidan los movimientos voluntarios.	Terapia pasiva, terapia de juego y terapia de entrenamiento	Flexo-extensión, abducción-aducción, rotación interna-externa	NO	SI	NO	SI	condiciones de asepsia y mayor diseño a nivel de recubrimientos de estructura
	Holanda	2009	Armeo Boom	De uso terapéutico en clínicas y hogar, para pacientes con alteración leve o moderada del movimiento.	Terapia de juego y terapia de entrenamiento	Flexión, extensión, flexión y extensión horizontal	SI	NO	NO	SI	En dispositivos con apoyos virtuales terapéuticos(lúdicos) tendría que cuidarse de factores altamente tecnológicos para evitar choques culturales.
	California, USA	2012	Armeo Spring	Indicado para los pacientes que están empezando a recuperar el movimiento activo del brazo y la mano.	Terapia pasiva, terapia de juego y terapia de entrenamiento	Abducción, flexión, Abducción horizontal, rotación interna y externa	NO	NO	NO	SI	Indicado para personas en condición de discapacidad

1.4. Productos:

La Tabla 2 presenta la cantidad y tipo de productos pactados en el Acta de Trabajo y Compromiso, así como los productos finalmente presentados:

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
Productos de nuevos conocimientos				
Artículo completo presentados en revistas A1 o A2	1		1	
Normas basadas en resultados de investigación				
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis
Estudiantes de doctorado	1		1	1
Estudiantes de pregrado	1		2	2
Semilleros	2		2	
Productos de divulgación				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacional es
	1	1	3	1
Propuestas presentadas en convocatorias para búsqueda de financiación.	1		2 internas, 1 externa	0

Tabla 2. Cantidad y tipo de productos pactados y presentados

La tabla 3 presenta una información detallada de los productos presentados

Tipo de producto:	Artículo Revista seriada A2, SCOPUS Q2
Nombre General:	Dyna
Nombre Particular:	Design of a physiscal rehabilitation system with teleoperation via the internet for technical assistance under a service-oriented architecture.
Participantes:	Cristian D. Chamorro – Nayiver Gladys Caicedo – José Isidro García

Tipo de producto:	Formación
Nombre General:	Doctorado en Ingeniería énfasis en Eléctrica y electrónica
Nombre Particular:	Arquitectura con Orientación a Servicios para rehabilitación Tele-operada
Participantes:	Cristian David Chamorro Rodríguez

Tipo de producto:	Formación
Nombre General:	Maestría en ingeniería
Nombre Particular:	Asistente de investigación

Participantes:	Arlex Leyton
----------------	--------------

Tipo de producto:	Formación
Nombre General:	Ingeniería Mecánica
Nombre Particular:	Design and construction of a hand rehabilitation protoype
Participantes:	Nicolas Ramirez

Tipo de producto:	Formación
Nombre General:	Ingeniería Mecánica
Nombre Particular:	diseño de una ayuda técnica semiautomática tele-operada para rehabilitación fisioterapéutica de hombro
Participantes:	Mauricio Delgado Ramos

Tipo de producto:	Formación
Nombre General:	Diseno Industrial
Nombre Particular:	Rehand, bienestar al alcance de tus manos
Participantes:	Juan Antonio Urbano R.

Tipo de producto:	Formación en investigación
Nombre General:	Monitoria
Nombre Particular:	Monitoria en investigación
Participantes:	Jesus Caratar

Tipo de producto:	Formación en investigación
Nombre General:	Monitoria
Nombre Particular:	Monitoria en investigación
Participantes:	Jaiber Pena Zapata

Tipo de producto:	Propuesta de investigación Externa 52064
Nombre General:	715 - 2015 convocatoria para proyectos de investigación y desarrollo en ingenierías - 2015
Nombre Particular:	Evaluación integral de un sistema de atención tele-asistida para rehabilitación física de lesiones de hombro
Participantes:	José Isidro García

Tipo de producto:	Ponencia nacional
Nombre General:	XII semana universitaria de ingeniería
Nombre Particular:	Hacia una rehabilitación física de hombro independiente de la localización paciente-profesional de la salud.
Participantes:	Cristian Chamorro, Gladys Caicedo, José García

Tipo de producto:	Ponencia nacional
Nombre General:	XII semana universitaria de ingeniería
Nombre Particular:	Diseño y construcción de un prototipo sistema de rehabilitación de mano
Participantes:	Nicolás Ramírez, Juan Urbano, Cristian Chamorro, José García

Tipo de producto:	Ponencia institucional
Nombre General:	8vo evento de innovación Innouve
Nombre Particular:	Diseño y desarrollo de sistemas para rehabilitación humana tele-operadas, casos de aplicación hombro y rodilla
Participantes:	Cristian Chamorro

Tipo de producto:	Ponencia internacional, Buenos Aires, Argentina
Nombre General:	X encuentro latinoamericano de diseño
Nombre Particular:	Metodologías de diseño para sistemas de rehabilitación
Participantes:	Nicolás Ramírez, Juan Antonio Urbano

Tabla 3. Detalle de productos.

1.5. Impactos Actual o Potencial:

Los impactos de este proyecto se pueden agrupar en impactos sociales y económicos como se muestra a continuación:

1.5.1. Impactos sociales:

Considerando que el acceso a la salud es un servicio fundamental de la población colombiana, la infraestructura ofrecida con el desarrollo de este proyecto permite favorecer a una parte de la población que por sus condiciones de vulnerabilidad geográfica se le dificulta el acceso al servicio de rehabilitación física. Los resultados de este proyecto facilitarían al atendimento en rehabilitación física de hombro a una población localizada en las periferias de la Ciudad de Cali y sus zonas rurales. De esta forma, es posible que esta población asegure la recuperación funcional de hombro y permita realizar actividades de la vida diaria, lo cual afecta directamente los indicadores de calidad de vida del individuo.

1.5.2. Impactos económicos:

El desarrollo e implementación de este proyecto beneficiaría de manera directa al paciente en cuanto a sus gastos en desplazamiento a ciudades principales donde prestan el servicio especializado de rehabilitación, además para las entidades prestadoras del servicio de rehabilitación este sistema trae beneficios económicos importantes ya que optimizan el recurso humano al momento de prestar los servicios de rehabilitación.

REFERENCIAS

- [1] DANE, "Censo General" Dirección de censos y demografía, Valle del Cauca 2005.
- [2] Romero, D.; Las Actividades de la Vida Diaria; En: Anales de Psicología; Vol. Nº 23; Nº 2; Diciembre. 2007; p. 8.
- [3] DANE, "Censo General" Dirección de censos y demografía, Valle del Cauca 2010.
- [4] Nordin. M. Frankel, V; Biomecánica Básica del sistema musculoesquelético, McGraw Hill, 2004, Madrid, España.
- [5] Lopera J. E. (2004) Diseño, construcción y evaluación de una unidad de movimiento pasivo continuo para rodilla. Trabajo de grado, Universidad del Valle.
- [6] OPTIFLEX 3 C.P.M. PARA RODILLA, Fisiomedica, Cali, Colombia.
- [7] FLEX-MATE K 500 service manual warranty, KLC services inc.
- [8] KINETIC SPECTRA KNEE C.P.M, isokineticsinc. Boston U.S.A.
- [9] FISOTEK 2000T, Rimec, London, U.K.
- [10] <http://www.elergonomista.com/antropometria.htm> Visitado el día: febrero 9 de 2013 a las 8:00 pm.
- [11] Galvis Luna E., Rincon D. Diseño y construcción de un prototipo de una unidad de movimiento pasivo continuo (umpc) para terapia del tobillo

- [12] Chavez Arreola A. (2009) diseño mecánico de una máquina para terapia de movimiento pasivo continuo en la rodilla. Tesis Profesional, Instituto Politécnico Nacional.Zacatenco,Mexico.
- [13] Nef T, Mihelj M, Kiefer G, Pemdl C, Muller R and Riener R. (2007), ARMin Exoskeleton for Arm Therapy in Stroke Patients. IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics.
- [14] Ayala, J. Exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior, Tesis de maestría, Exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior. 2012.
- [15] Han, J., Han, C., Jang, H., Jang, J., Lee, Y., & Hong, S. (2010). WIPO Patent No. 2010071252. Geneva, Switzerland: World Intellectual Property Organization.
- [16] Brokaw, E., Nichols, D., Holley, R., Murray, T., Nef, T., Lum, P., Time independent functional task training: a case study on the effect of inter-joint coordination driven haptic guidance in stroke therapy, 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp 1-6, 2011.
- [17] Dasheek N, Riaan S, Glen B and Shaniel D. (2011). A 7 DOF Exoskeleton Arm:Shoulder,Elbow,Wrist and Hand Mechanism for Assistance to Upper Limb Disabled Individuals. IEEE Africon 2011.
- [18] Gutierrez, R. Niño-Suarez, P, Avilés-Sanchez, O. Vanegas, F. Y Duque, J., Exoesqueleto mecatronico para rehabilitación motora, 8vo Congreso iberoamericano de Ingenieria Mecánica pp 1-9, 2007.
- [19] Perry J. C., Rosen, J. Y Burns, S., Upper limb powered exoskeleton design, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12 No. 4, pp 408-417, 2007.
- [20] Wu, T. M., Wang, S. Y., & Chen, D. Z. (2011). Design of an exoskeleton for strengthening the upper limb muscle for overextension injury prevention. Mechanism and Machine Theory, 46(12), 1825-1839.
- [21] Kiguchi, K., Active exoskeletons for upper-limb motion assist, International Journal Humanoid Robotics, Vol. 4, No. 3, pp. 607-624, 2012.

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

CAPITULO 2. SOPORTE TECNICO DEL DISEÑO

En este capítulo se presenta el diseño de la estructura mecánica del sistema de rehabilitación de hombro, la estructura del sistema eléctrico y electrónico, el diseño del sistema informático de tele-operación y finalmente el sistema de seguridad el cual fue modelado mediante redes de Petri coloreadas para verificar el comportamiento de las eventualidades.

Rangos Funcionales

Los rangos funcionales representan la amplitud y direcciones de movimientos alcanzados en la rehabilitación, los cuales garantizan el cumplimiento de las Actividades de la Vida Diaria. En la Figura 1 se muestran los movimientos y rangos funcionales de la articulación del hombro, los cuales son:

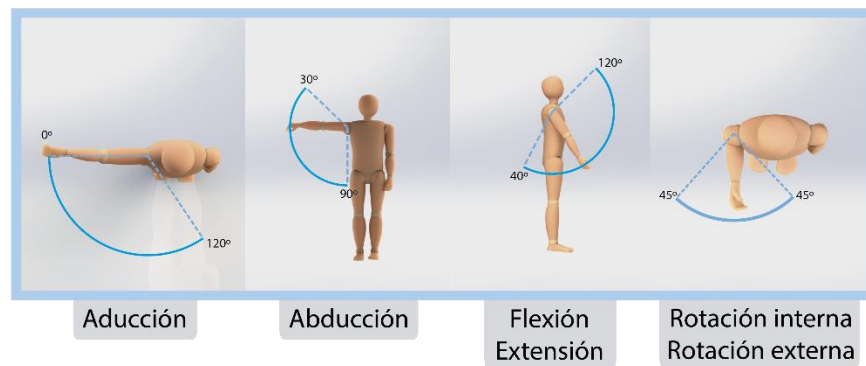


Figura 1 - Movimientos y rangos funcionales del hombro, Autor

Biomecánica de la articulación de hombro

En el análisis cinemático y cinético se definieron los rangos máximos de movimientos, centros de gravedad y condiciones estáticas de carga, con el fin de determinar la potencia necesaria para mover el miembro superior (brazo). En la figura 2 se muestran los segmentos del miembro superior, los puntos de aplicación del peso de cada miembro y las longitudes con referencia a la articulación del hombro. Con base en el diagrama de cuerpo libre se determinaron los torques necesarios para desplazar el miembro superior. Este análisis cinético se realizó considerando una persona con una masa de 130 kg, masa que se encuentra muy por encima del promedio de la población colombiana. Esta consideración permite que el diseño considere un percentil 95 de la población.

En la Tabla 1, se indica el peso de cada segmento que conforma el miembro superior. El segmento 1 corresponde al brazo, el segmento 2 al antebrazo y el segmento 3 a la mano. El porcentaje del peso del segmento es en relación con el peso total de la persona, en este caso la referencia son los 130 kg de masa mencionados.

Tabla 1. Pesos de los segmentos del miembro superior

Nombre del segmento	Porcentaje del peso del segmento (%)	Masa del segmento (kg)	Peso del segmento (N)
Brazo	2,7	3,510	34,419
Ante brazo	1,6	2,080	20,396
Mano	0,7	0,910	8,923
		6,500	63,739

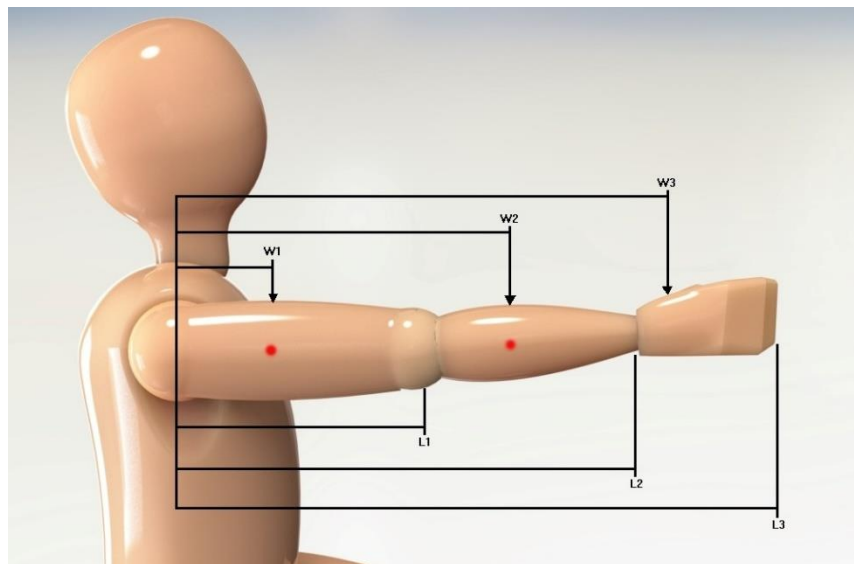


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre miembro superior

En la figura 2 se presentan las longitudes de cada uno de los miembros que conforman el brazo. En la tabla 2 se presentan las longitudes y se determinan los centros de gravedad de cada uno de los segmentos del miembro superior.

Tabla 2. Longitudes y centros de masa de los segmentos del brazo

Segmento del miembro superior	Longitudes (m)	Longitud Acumulada (m)	Ubicación del centro de masa (m)
Brazo	0,36	0,36	0,18
Ante brazo	0,27	0,63	0,495
Mano	0,19	0,82	0,725

Para seleccionar el elemento final de control que permitirá generar el movimiento al brazo, se requieren conocer el torque necesario para mover cada uno de los

segmentos de manera independiente. El torque total está conformado por: el torque estático y el torque dinámico, los cuales fueron calculados para cada segmento. En la Tabla 3 se presentan los resultados del torque estático por segmento. El torque dinámico únicamente afecta en 1%. Además, en el torque total se consideró un factor de seguridad de 1.3, para garantizar condiciones anómalas de operación del sistema (indebida manipulación de la máquina) y que este no sufra ningún tipo de daño.

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 3, se concluye que el sistema de actuación debía ser un conjunto moto-reductor con una salida de torque mínimo de 30 Nm.

Tabla 3. Torque total requerido para mover el brazo

Segmento	Torque (N.m)
Brazo	6,195
Ante brazo	10,096
Mano	6,470
Torque Estático total	22,761
Aporte dinámico = 1%	0,23
Factor de Seguridad	1,3
Torque Requerido	29,885

2.1.2. Movimientos de rehabilitación permitidos por la estructura mecánica

La estructura mecánica ofrece la posibilidad de realizar dos tipos de movimiento para rehabilitación, extensión y flexión.

2. Resultados de la máquina de rehabilitación de hombro

En este diseño también se consideraron requerimientos: funcionales, de seguridad, de ergonomía, percepción y tele operación. Además, se tuvieron en cuenta los movimientos a rehabilitar para que el paciente recupere su movilidad de acuerdo a las AVD. El diseño de la máquina es sencillo, no invasivo para el paciente y con una estructura liviana pero resistente. Además, se consideraron aspectos que brindan al paciente percepción de tranquilidad, seguridad y confianza para el uso de la máquina. Esta máquina fue diseñada bajo requerimientos definidos por la arquitectura con orientación a servicios planteada para la tele-operación.

2.1 Funcionamiento y grados de libertad de la máquina de hombro

La máquina de rehabilitación de hombro permite al paciente realizar terapias de rehabilitación pasiva y activa en tres grados de libertad, esto significa que recupera

la movilidad y fortalecimiento muscular en seis movimientos articulares. Estos grados de libertad se realizan mediante dos moto-reductores, los cuales se seleccionaron de acuerdo al análisis estático y dinámico de cargas para miembro superior.

Propuesta de diseño

Una vez se han integrado todos los requerimientos puntuales y se ha establecido el diseño conceptual se puede proceder entonces a elaborar la propuesta de diseño, donde se lleva al detalle la elaboración de las piezas y componentes a utilizar obteniendo como resultado el objetivo de este trabajo de grado.

En la figura 3 se muestra la propuesta final de diseño, con todos sus componentes y sub ensambles; Unidad de potencia (E1), Silla (E2), Marco superior (E3), Carro (E4), Motriz (E5) y Brazo (E6).

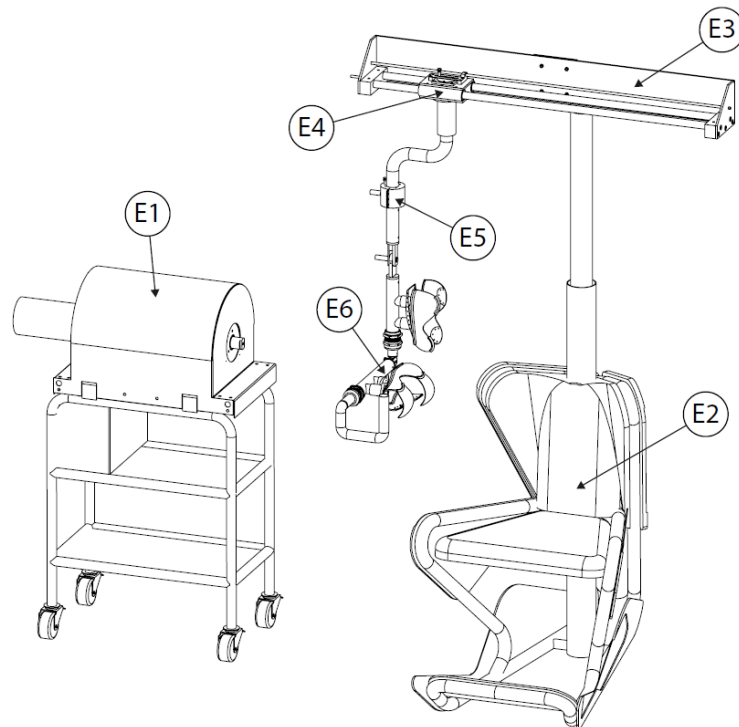


Figura 3. Ayuda técnica semiautomática para rehabilitación de hombro

El sistema está compuesto por seis sub-ensamblajes, los cuales ejecutan distintas funciones en el desarrollo del funcionamiento global de la ayuda tecnológica presentada:

Unidad de potencia (E1)

Está compuesta por un conjunto de Moto-reductor, ver Figura 4, el cual a través de un eje, provee potencia a un sistema de embrague electrónico que es el encargado

de acoplar o desacoplar el motor, proceso vital para el cambio de terapia pasiva a activa. Otro elemento es un freno de partículas magnéticas, encargado de detener los movimientos, asegurar la posición del actuador y generar una carga opuesta al movimiento que ejerce el paciente durante la terapia activa. Ambos componentes forman parte integral del sistema de seguridad ya que actúan cuando hay un sobre esfuerzo en el sistema. Esta solución simplifica los componentes mecánicos y otorga un mayor grado de control y censado de datos.

El sistema de potencia que se muestra en la figura 4, es un estándar diseñado por los integrantes del grupo de investigación, ya que puede ser utilizado para la rehabilitación de otras articulaciones únicamente con simples adaptaciones. En este caso de la articulación del hombro se conecta a los acoples que permiten el movimiento por medio de un eje flexible de guaya bidireccional, el cual simplifica los mecanismos para transmisión o transformación de los movimientos.

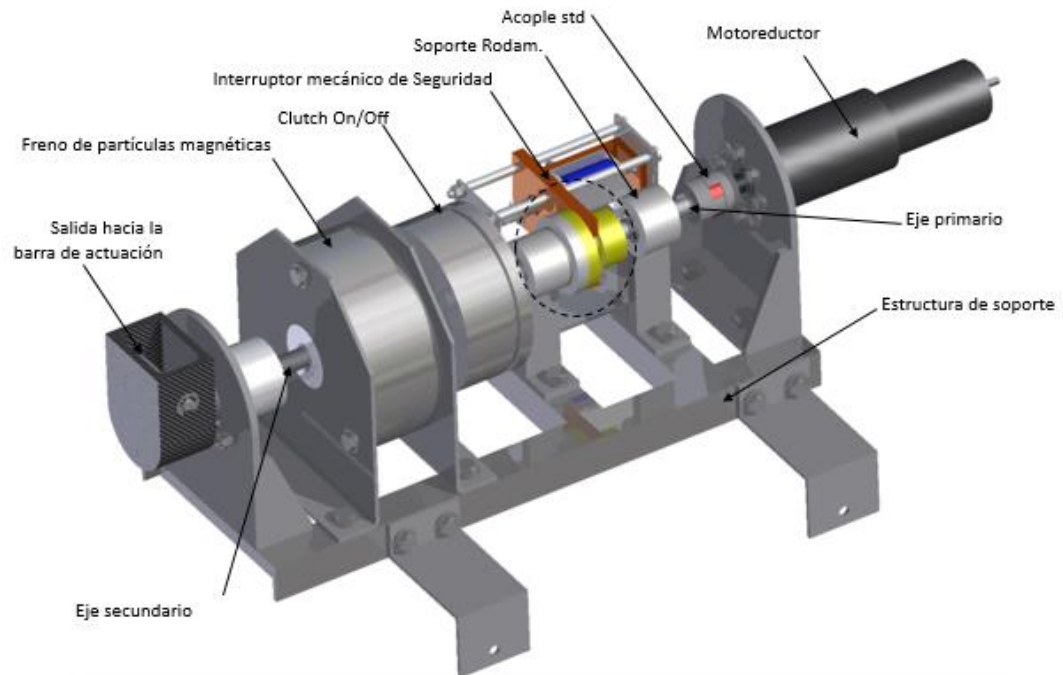


Figura 4. Sistema de potencia

Silla (E2)

Esta silla hace parte del sistema de rehabilitación del hombro y está compuesta por un marco en tubería de acero 1020, cojines ergonómicos y paneles decorativos como se ilustra en la figura 5, sus funciones es sostener al paciente en una posición cómoda y segura durante la duración de la terapia, ofreciendo protecciones pasivas

en forma de barreras para prevenir interferencias o colisiones durante los movimientos de la terapia.

En el diseño de la silla se consideraron criterios de ergonomía al disponer de características antropométricas adecuadas y asepsia. Con la finalidad de sostener, asegurar y dar confort al paciente.

Para su fabricación se imprime un plano escala 1:1 de las vistas lateral y superior para que se moldee la estructura tubular sobre la plantilla. Los cojines incluyen materiales que permiten la transpiración, para evitar el aumento de temperatura en el paciente.

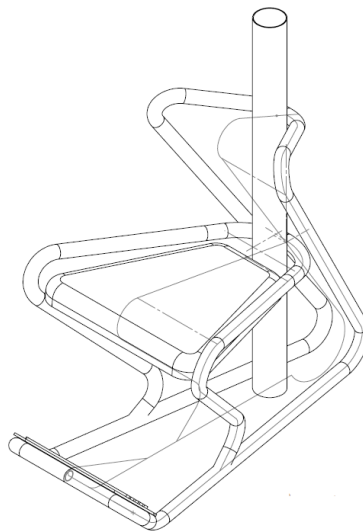


Figura 5. Silla del sistema de rehabilitación de hombro

Marco Superior (E3)

La función principal del marco superior es guiar y sostener todas las partes móviles del sistema. Está compuesto por dos guías cilíndricas paralelas, como se muestra en la Figura 6, las cuales limitan el movimiento del carro a un solo grado de libertad y garantizan su posición por medio del tornillo de posicionamiento, accionado electrónicamente o manualmente. El resto de componentes tienen la función de unir y sostener rigidamente el sistema, minimizando las flexiones durante la ejecución de la terapia.

El marco superior es sostenido por la columna principal de la máquina, la cual permite ajustar la altura del marco superior de acuerdo a las dimensiones del paciente.

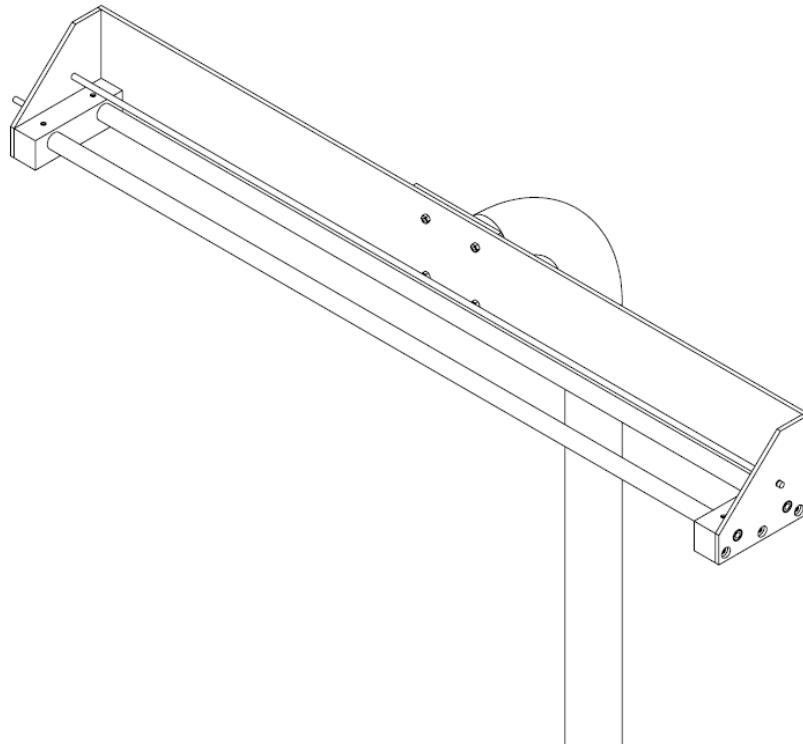


Figura 6. Ensamble Marco superior

Ensamble Carro (E4)

En la figura 7 se presenta el ensamble carro, el cual está compuesto de bujes de bronce auto lubricados, los cuales se deslizan sobre las guías del marco superior. Este componente se encarga de facilitar el giro del marco superior y garantizar su rigidez en cuanto a movimientos verticales. El seleccionador de posición fija el marco superior en la posición izquierda o derecha dependiendo de la rehabilitación requerida. Esto se logra mediante un pin, que es accionado por un resorte y un bloque roscado que desplaza linealmente este ensamble y lo fija en una posición.

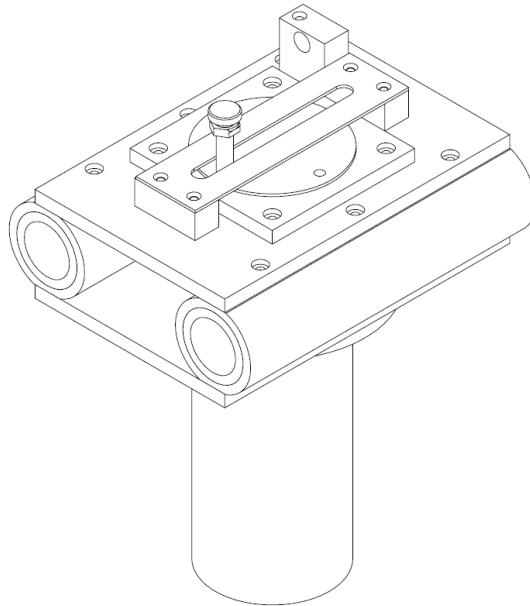


Figura 7. Ensamble Carro

Ensamble Motriz (E5)

En este ensamble motriz se encuentran los principales componentes que transmiten el movimiento de rehabilitación al paciente. Desde aquí se accionan 2 grados de libertad del sistema, estos movimientos se logran por medio del Eje 1 y el Eje 2, como se muestra en la figura 8. La construcción en bronce en varios de sus componentes facilita el movimiento relativo entre sus partes, el uso de rodamientos no fue necesario debido a las bajas velocidades y cargas. Todos los elementos tubulares se debieron diseñar con acoples para garantizar un movimiento solidario.

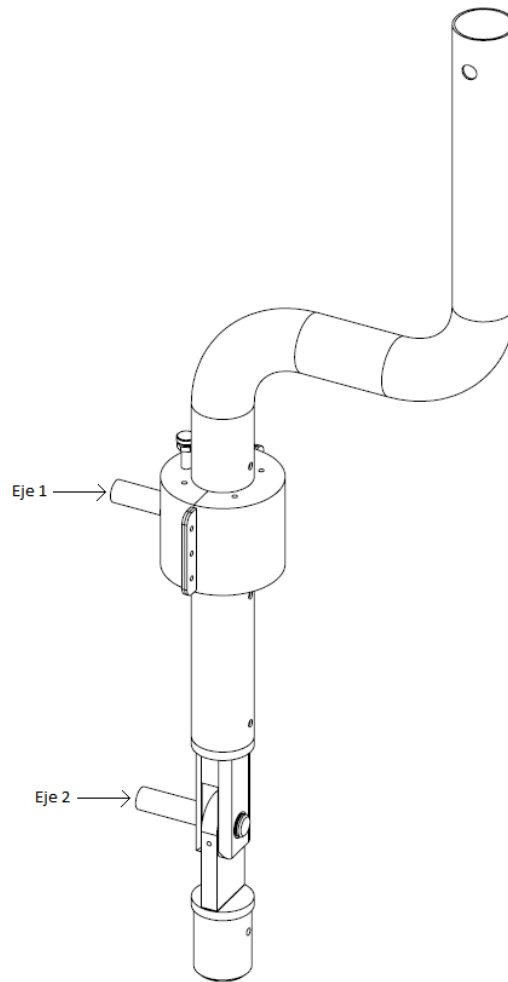


Figura 8. Ensamble Motriz

Ensamble Brazo (E6)

El ensamble de brazo está compuesto por elementos tubulares telescópicos, hechos en acero inoxidable satinado. Este ensamble es el encargado de ajustarse a las características antropométricas de los usuarios, el diseño está basado en el percentil 95 de la población colombiana. Las longitudes son controladas por medio de prensaestopas comerciales las cuales generan facilidad de manejo para el coequipero en el momento de configurar el sistema para un nuevo usuario. Este ensamble también posee las férulas como se ilustra en la Figura 9, para el desarrollo del prototipo las férulas se imprimieron en 3D.

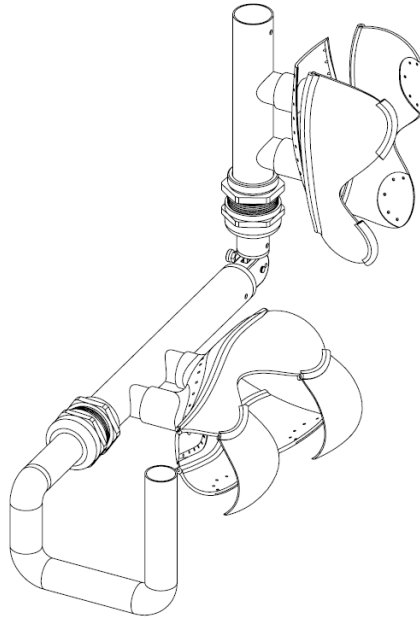


Figura 9. Ensamble Brazo

Verificación de la propuesta de diseño

Considerando que las velocidades y cargas a las cuales será sometido el sistema de rehabilitación de hombro son bajas respecto a las dimensiones y capacidades se utilizaron los materiales siguientes: acero inoxidable y aluminio, (torques de menos de 30Nm Y velocidades menores de 60° /s).

La verificación del diseño se centra en la rigidez de los dos elementos principales: Ensamble motriz y ensamble del brazo, para la verificación del diseño se utilizó una herramienta donde se realizaron simulaciones y el análisis de los resultados permitió validar el diseño. Las simulaciones realizadas consideraron la configuración más crítica en la rehabilitación del paciente cuando se tiene el brazo completamente extendido, que es cuando se genera el mayor momento flector, como se ilustra en la figura 10.

En la tabla 4 se ilustran los componentes y materiales utilizados en el diseño.

Tabla 4. Componentes usando en el FEM

Numero	Pieza	Material	Ensamble
8	Seleccionador Superior	Aluminio	Carro
18	Eslabon Superior	Acero Inoxidable	Ensamble Motriz
19	Porta Ejes	Bronce	Ensamble Motriz
20	Complemento Porta Ejes	Bronce	Ensamble Motriz
21	Carcasa	Cero Inoxidable	Ensamble Motriz
22	Buje carcasa	Bronce	Ensamble Motriz
23	Eje entrada superior	Acero al carbono	Ensamble Motriz
25	Eje salida superior	Bronce	Ensamble Motriz
26	Extension	Acero Inoxidable	Ensamble Motriz
27	Bisagra superior	Aluminio	Ensamble Motriz
28	Bisagra inferior	Aluminio	Ensamble Motriz
29	Eje entrada inferior	Acero al carbono	Ensamble Motriz
30	Buje eje inferior	Bronce	Ensamble Motriz
33	Brazo Externo	Acero Inoxidable	Brazo
34	Brazo Interno	Acero Inoxidable	Brazo
35	Buje Brazo	Nilon	Brazo
36	Antebrazo Externo	Acero Inoxidable	Brazo
37	Antebrazo Interno	Acero Inoxidable	Brazo
38	Buje Antebrazo	Nilon	Brazo
39	Codo superior	Aluminio	Brazo
40	Codo inferior	ALuminio	Brazo

En la figura 10 se muestran las condiciones de borde, malla y ubicación de las cargas utilizadas. Se aplicó una condición de soporte fijo sobre el elemento 8 y una carga de 65N fue aplicada en una superficie auxiliar al extremo de la extensión del antebrazo, representando así la condición más extrema a la cual se podría enfrentar el sistema.

En la simulación se utilizó una malla sólida que permitió modelar matemáticamente el elemento mediante curvaturas representadas en 4 puntos Jacobianos, fueron usados tetraedros de seis nodos pues se obtenía una malla uniforme en las áreas de contacto, con una calidad de elementos cuadráticos de alto orden. También se realizaron controles de malla y refinamientos en las áreas de contacto, especialmente en agujeros y piezas de unión entre tubos.

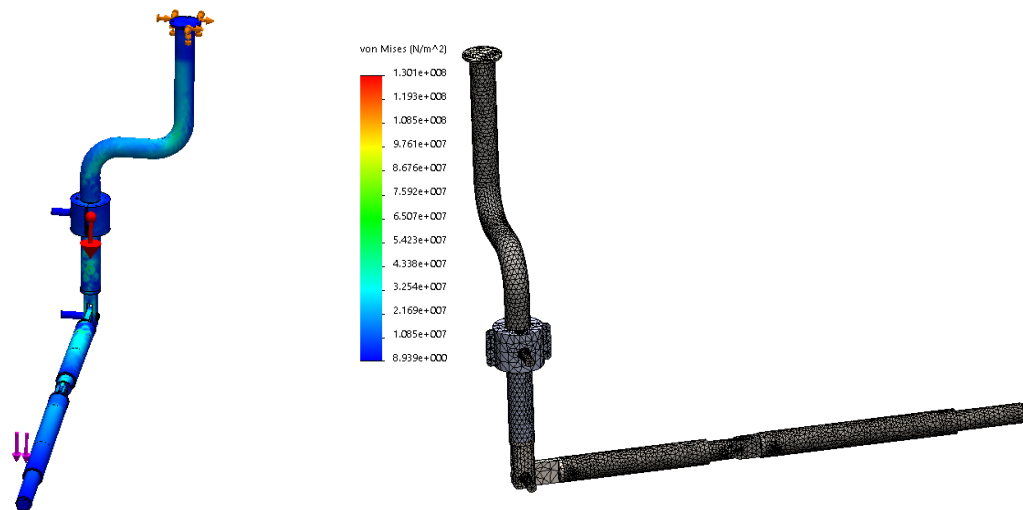


Figura 10 - Análisis estático y malla usada – Tensión de Von Mises

El análisis del diseño para verificar la resistencia de sus materiales, se realizó utilizando elementos finitos y se concluyó que ningún componente está expuesto a cargas que puedan llevarlo a falla. Todos los elementos se encuentran alejados de su punto de fluencia ($2,9\text{e}+008$ pascales), con al menos un factor de seguridad de 4,4. Concluyendo que el diseño es el adecuado para este tipo de condiciones de trabajo.

Una vez se evaluó la resistencia se procedió a evaluar los desplazamientos y vibraciones. En la figura 11 se puede observar la simulación para evaluar estos aspectos, se consideraron las condiciones más adversas, de acuerdo a la selección de materiales y diseño en la geometría de los perfiles, se concluyó que esta configuración permite desplazamientos muy pequeños en los puntos más críticos, se obtuvo un desplazamiento máximo de 5mm en el extremo libre. Lo cual implica una deformación angular de $0,43^\circ$. Este ángulo no afecta en el desarrollo de la rehabilitación.

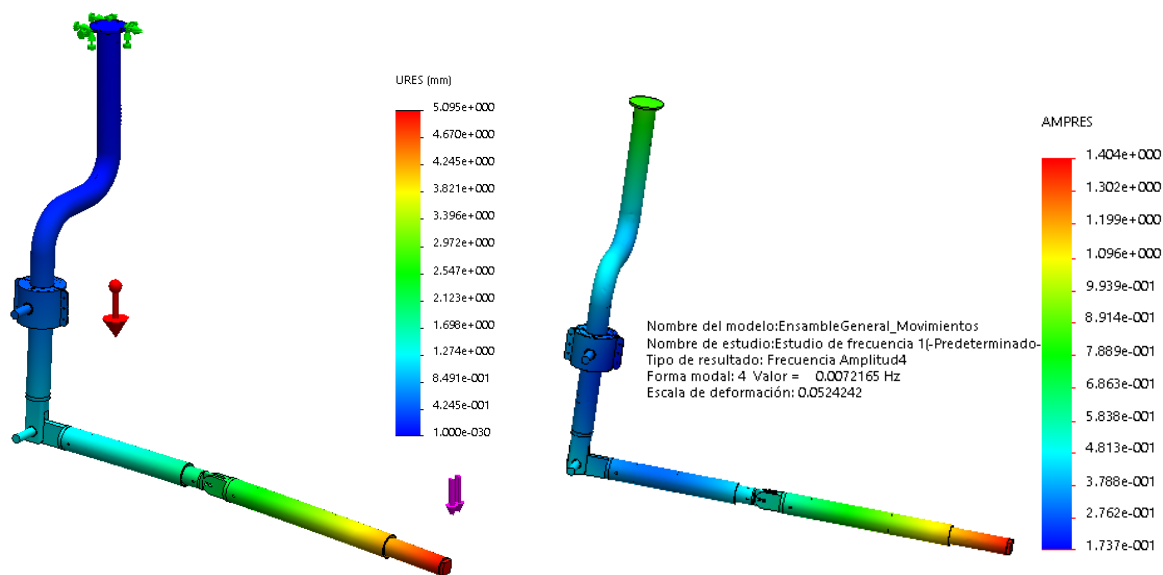


Figura 11. Análisis estático – Desplazamientos y vibraciones. Autor

También se realizaron pruebas de vibración y frecuencia modal para analizar problemas de resonancia, pues las velocidades de trabajo son bajas respecto a la capacidad de los materiales y geometrías usados. El estudio de vibraciones para frecuencias modales de trabajo fue de 0,07Hz, en la tabla 5 se ilustran las frecuencias de resonancia encontradas, las cuales están muy por debajo de este valor.

Tabla 5. Análisis de vibración, frecuencia modal

Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
0.045343	0.0072165	138.57
0.048022	0.007643	130.84

En la figura 12, se muestran los resultados de la verificación del diseño del análisis del portaejes, el porta ejes con su respectivo complemento como se ilustra en la tabla 5.

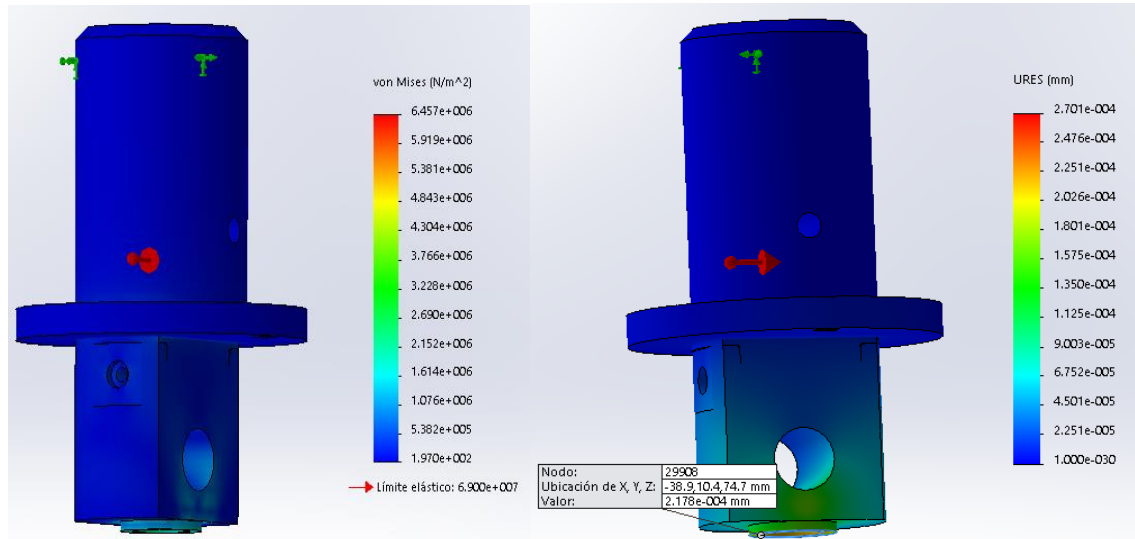


Figura 121. Esfuerzo y deformación porta ejes, Autor

Para este análisis se usaron condiciones de contacto sin separación ni fricción, se aplicó una condición de soporte fijo sobre la superficie cilíndrica superior. Las cargas aplicadas fueron de 65N, equivalentes a la fuerza máxima ejercida durante el desarrollo de una terapia. El modelo consistió en una malla solida estándar de 4 puntos jacobianos, una calidad de elementos cuadráticos de alto orden y elementos espaciadores de la malla alrededor de los 2,5mm. Ver figura 13.

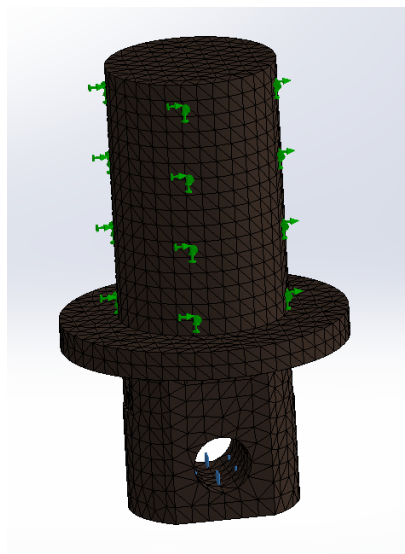


Figura 13. Malla usada para FEM de porta ejes, Autor

Los análisis del diseño en cuanto a resistencia y rigidez fueron validados bajo las condiciones críticas de operación, en la tabla 6 se presentan los requerimientos de diseño mecánico del sistema de rehabilitación de hombro.

Tabla 6 Requerimientos del diseño del sistema del sistema de rehabilitación de hombro

Global	General	Puntual	Solución otorgada
ASISTIR al paciente	UBICAR el paciente	SOSTENER	PROVEER un adecuado lugar para sostener el peso del paciente mediante la <i>Silla</i>
		ASEGURAR	FIJAR la extremidad a tratar a la máquina mediante las <i>Férulas</i>
			LIMITAR el movimiento de las piernas para no generar interferencia mediante las barreras de la <i>Silla</i>
		CONFORTAR	DISPONER de características antropométricas adecuadas mediante el diseño anatómico de las <i>Férulas</i> y <i>Silla</i>
			PONER en contacto la mínima superficie mediante apoyo lumbar en la <i>Silla</i>
	MOVER	LLEVAR	DETERMINAR la secuencia de accionamiento correspondiente, mediante las <i>tablas 17 y 18</i>
			ACCIONAR en forma secuencial cada GDL de la articulación, mediante los <i>Ejes 1 y 2</i>
		ACELERAR	EMPLEAR aceleraciones bajas y estables limitadas a 25°/s, mediante <i>moto-reductor</i> seleccionado
		DETENER	FRENAR de manera segura con una desaceleración controlada, mediante <i>freno de partículas magnéticas</i> .

FABRICACION DE LOS COMPONENTES

A continuación, se presentan despieces de los elementos mecánicos que hacen parte del sistema de rehabilitación del hombro. En las Figuras 14,15,16 y 17 se detallan los componentes de cada sub ensamblaje, se identifica cada una de las piezas para hacer referencia a sus procesos individuales de fabricación y en la Tabla 7 se presenta el listado de las piezas requerido para el proceso de manufactura. En la Tabla 8 se ilustran las piezas del sistema que no requieren proceso de fabricación, sino que son comerciales.

Todos los componentes de la Tabla 15 pesan un total de 21Kg, así al separarse todo el sistema en tres partes: sistema de potencia, silla, y ensambles se puede transportar fácilmente, ya que no excede el límite de peso definido por ergonomía y seguridad de 25 Kg.

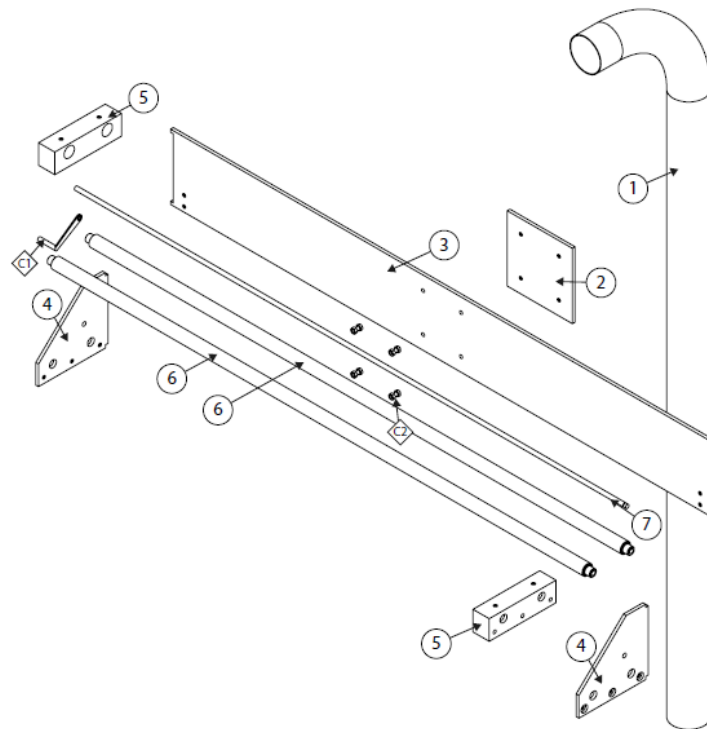


Figura 14.2 Detalle de componentes Marco superior, Autor

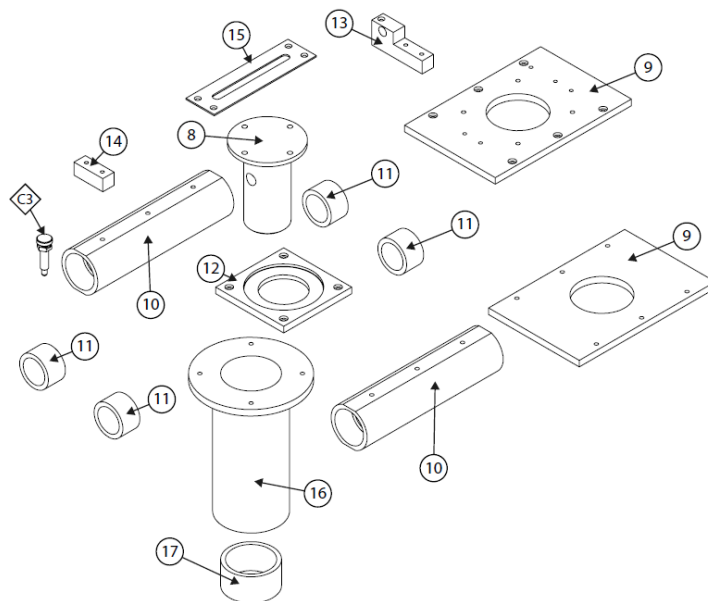


Figura 15. Detalle de componentes Carro, Autor

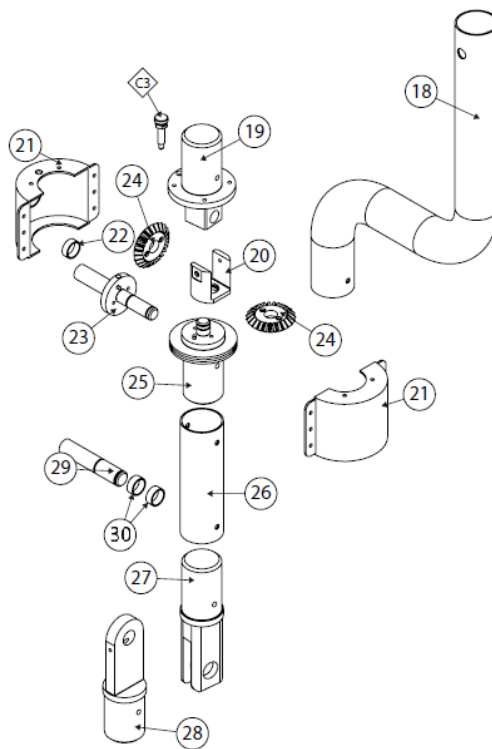


Figura 16. Detalle de componentes Motriz, Autor

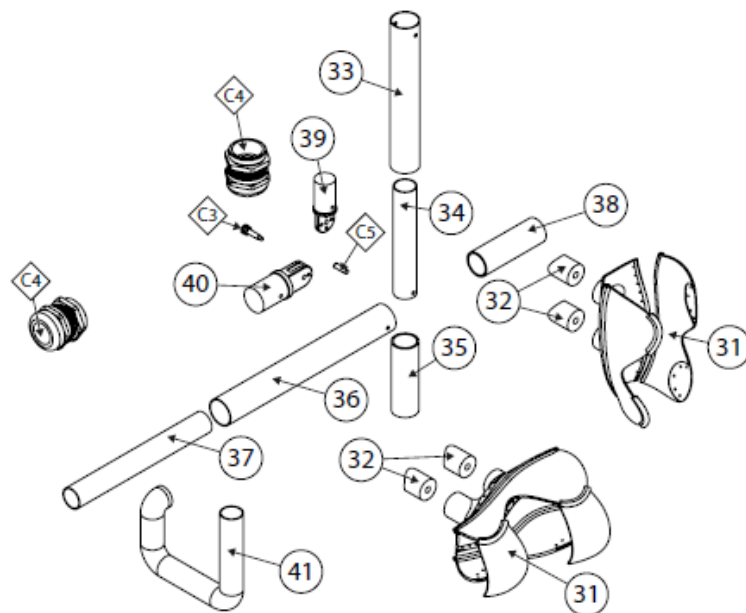


Figura 17. Detalle de componentes Brazo, Autor

Tabla 7. Detalle de piezas no standard que requieren procesos de manufactura

No.	Pieza	Cant	Peso unitario (Kg)	Peso total (Kg)	Ensamble	Material	Cant Proc	Corte Recto	Taladro	Machuelo	Torno y refrentado	Fresa	Rectificado	Doblado	Biselado	Soldadura	Otros
1	Columna principal	1	2,16	2,16	Marco Superior	Acero Inoxidable	3	X							X	X	
2	Placa de union	1	0,56	0,56	Marco Superior	Acero Inoxidable	2	X	X								
3	Placa principal	1	4,75	4,75	Marco Superior	Acero Inoxidable	2	X	X								
4	Laterales Marco	2	0,46	0,92	Marco Superior	Acero Inoxidable	2	X	X								
5	Soporte Guías	2	0,31	0,62	Marco Superior	Aluminio	4	X	X	X							Pachas
6	Guías	2	2,25	4,5	Marco Superior	Acero Inoxidable	3		X	X	X						
7	Tornillo posicionamiento	1	0,25	0,25	Marco Superior	Acero Galvanizado	1				X						
8	Seleccionador Superior	1	0,18	0,18	Carro	Aluminio		X	X		X		X				
9	Base Carro	2	0,33	0,66	Carro	Acero Inoxidable	3	X	X	X							
10	Porta Bujes	2	0,4	0,8	Carro	Acero Inoxidable	4			X		X	X				
11	Bujes Carro	4	0,03	0,12	Carro	Bronce	3	X	X		X						
12	Soporte Hombro	1	0,1	0,1	Carro	Bronce	3	X	X			X					
13	Bloque roscado	1	0,02	0,02	Carro	Aluminio	3	X	X	X							
14	Soporte Seleccionador	1	0,01	0,01	Carro	Aluminio	2	X	X								
15	Platina Seleccionador	1	0,01	0,01	Carro	Acero Inoxidable	2	X	X								
16	Soporte Eslabon Superior	1	0,34	0,34	Carro	Aluminio	5		X		X			X	X	X	
17	Buje eslabon Superior	1	0,06	0,06	Carro	Bronce	3	X			X	X					
18	Eslabon Superior	1	0,39	0,39	Ensamble Motriz	Acero Inoxidable	3	X							X	X	
19	Porta Ejes	1	0,43	0,43	Ensamble Motriz	Bronce	5		X	X	X	X	X				
20	Complemento Porta Ejes	1	0,04	0,04	Ensamble Motriz	Bronce	4		X		X	X	X				
21	Carcasa	2	0,09	0,18	Ensamble Motriz	Cero Inoxidable	5	X	X						X	X	Rolado
22	Buje carcasa	1	0,01	0,01	Ensamble Motriz	Bronce	1				X						
23	Eje entrada superior	1	0,09	0,09	Ensamble Motriz	Acero al carbono	3		X	X	X						
24	Engranaje Conico	2	0,03	0,06	Ensamble Motriz	Acero al carbono	1		X								
25	Eje salida superior	1	0,4	0,4	Ensamble Motriz	Bronce	3		X	X	X						
26	Extension	1	0,09	0,09	Ensamble Motriz	Acero Inoxidable	1	X									
27	Bisagra superior	1	0,22	0,22	Ensamble Motriz	Aluminio	3				X	X	X				
28	Bisagra inferior	1	0,17	0,17	Ensamble Motriz	Aluminio	4		X		X	X	X				
29	Eje entrada inferior	1	0,05	0,05	Ensamble Motriz	Acero al carbono	2		X		X						
30	Buje eje inferior	2	0,01	0,02	Ensamble Motriz	Bronce	1				X						
31	Ferula	2	1,17	2,34	Brazo	Plastico	1										Impresión 3D
32	Union Ferula	4	0,01	0,04	Brazo	Acero Inoxidable	5	X	X	X					X	X	
33	Brazo Externo	1	0,18	0,18	Brazo	Acero Inoxidable	1	X									
34	Brazo Interno	1	0,1	0,1	Brazo	Acero Inoxidable	1	X									
35	Buje Brazo	1	0,02	0,02	Brazo	Nilon	2	X			X						
36	Antebrazo Externo	1	0,23	0,23	Brazo	Acero Inoxidable	1	X									
37	Antebrazo Interno	1	0,15	0,15	Brazo	Acero Inoxidable	2	X							X		
38	Buje Antebrazo	1	0,02	0,02	Brazo	Nilon	2	X			X						
39	Codo superior	1	0,08	0,08	Brazo	Aluminio	4		X		X	X	X				
40	Codo inferior	1	0,16	0,16	Brazo	Aluminio	5		X	X	X	X	X				
41	Mango	1	0,23	0,23	Brazo	Acero Inoxidable	3	X							X	X	

Tabla 8. Piezas comerciales

No.	Pieza	Ensamble	Cantidad	Medida critica
C1	Manivela	Marco Superior	1	Agujero 1/4
C2	Perno hexagonal	Marco Superior	14	M5 x 10mm
C3	Pin con resorte	Carro / Brazo/Motriz	4	Diámetro 5mm
C4	Prensa Estopa	Brazo	2	Diámetro 25,4mm
C5	Pin Pasador	Brazo	1	Diámetro 5mm
C6	Tuerca Hexagonal	Marco Superior	4	M5
C7	Tornillo Allen #3	Carro/ Marco Sup	20	#3 x 8mm
C8	Tornillo cabeza plana	Carro	12	#3 x 8mm
C9	Arandelas	Marco Superior	8	#3

2. FUNCIONAMIENTO MECANICO DEL SISTEMA DE REHABILITACION DEL HOMBRO

A continuación, se explica el funcionamiento del sistema mecánico requerido en las terapias de hombro. Se presentan las instrucciones para configurar los seleccionadores y los mecanismos que permiten bloquear las terapias activas y pasivas para los movimientos de aducción, abducción, flexión – extensión y rotación interna – externa tanto para hombro derecho como izquierdo. En la figura 18 se ilustra la configuración del sistema mecánico.

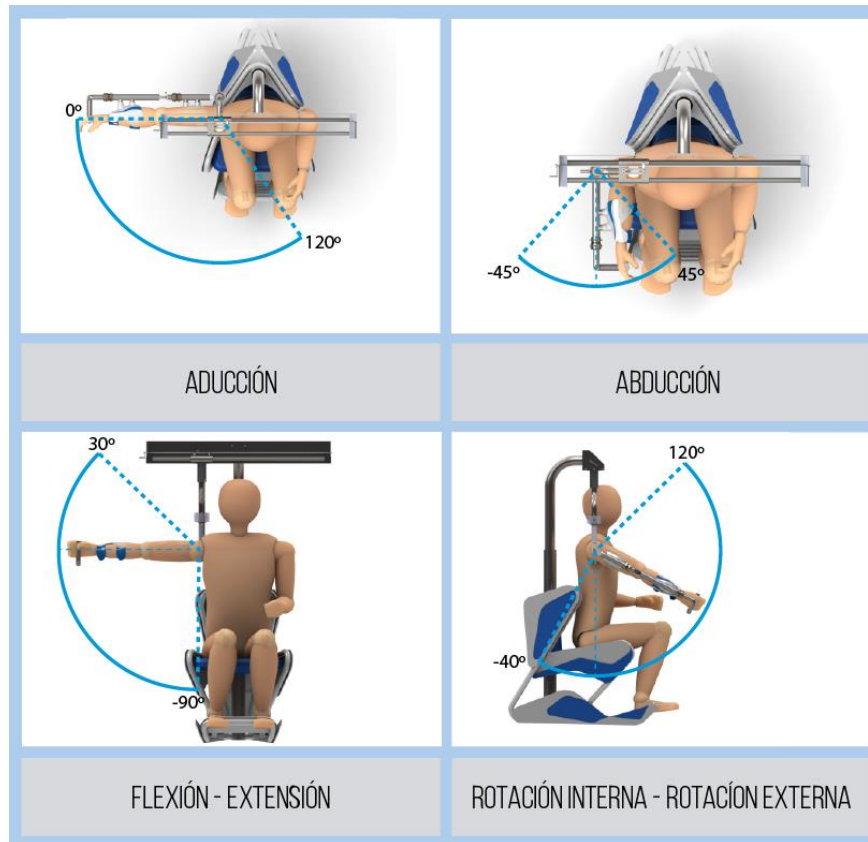


Figura 18. Configuración del sistema mecánico para terapias.

Para configurar la selección del hombro a tratar (izquierdo o derecho), se determina la posición base del seleccionador superior en el ensamble del carro, que se ilustra en la figura 19, el agujero bajo el pin, permite seleccionar los grados requeridos y estos se aumentan en seleccionador anti horario de 0° hasta 360° en incrementos de 90°.

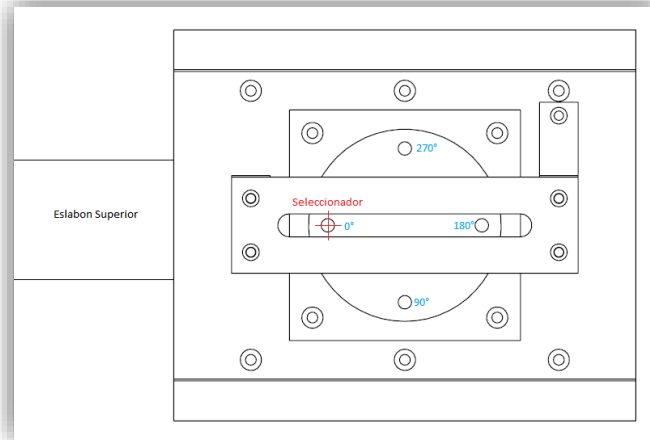


Figura 19. Seleccionador superior, Autor

Para la ubicación del brazo extendido o doblado a 90°, el procedimiento es similar al anterior, para este caso se utiliza un seleccionador de tres posiciones, 90°, 180° y 270° como se muestra en la figura 20.

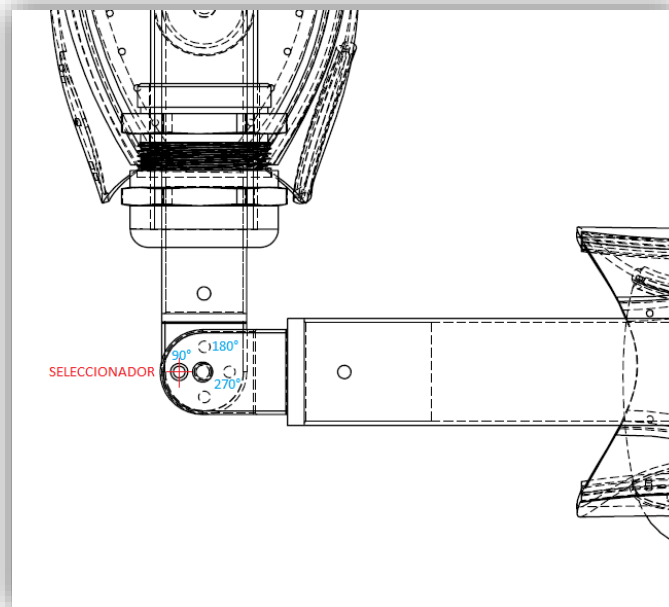


Figura 20. Seleccionador posición brazo

Además del posicionamiento de los dos selectores descritos, se requiere movimiento de rehabilitación a través de los Ejes 1 y 2, los cuales están acoplados por medio del eje flexible con la unidad de potencia. Las configuraciones del sistema mostradas en las

Tablas 9 (hombro derecho) y 10 (hombro izquierdo) ilustran las configuraciones para las distintas terapias.

Tabla 9. Posiciones para terapia hombro derecho

Configuración para hombro Derecho				
Ejercicio	Aducción	Abducción	Flexión y Extensión	Rotación int y externa
Codo	180°	180°	180°	90°
Seleccionador	90°	90°	0°	0°
Eje 1	Motriz	Bloqueado	Bloqueado	Motriz
Eje 2	Bloqueado	Motriz	Motriz	Bloqueado

Tabla 10 - Posiciones para terapia hombro izquierdo

Configuración para brazo Izquierdo				
Ejercicio	Aducción	Abducción	Flexión y Extensión	Rotación Int y externa
Codo	180°	180°	180°	270°
Seleccionador	90°	90°	180°	180°
Eje 1	Motriz	Bloqueado	Bloqueado	Motriz
Eje 2	Bloqueado	Motriz	Motriz	Bloqueado

2.2. Funcionamiento del Sistema Eléctrico y Electrónico del sistema de rehabilitación

Una descripción detallada de la estructura eléctrica y electrónica del sistema de rehabilitación del hombro se ilustra en la figura 21. Donde se especificaron dos modos de funcionamiento: local y remoto o distribuido. En modo local, los datos son ingresados a la unidad de control del mando mediante el teclado de membrana. Una vez ingresados estos datos a dicha unidad, esta los envía para que sean visualizados en la pantalla mediante una comunicación SPI. Adicionalmente, estos datos son enviados a la unidad de control de movimiento mediante una comunicación I^2C , la cual realiza el control de los movimientos requeridos de acuerdo a los parámetros ingresados. Para determinar la posición angular, se recibe una señal análoga proveniente del sensor de posición y una señal de pulso proveniente del encoder. La información del encoder permite calcular la velocidad a la cual se está realizando el movimiento y realizar su control mediante el envío de una señal PWM al driver de potencia.

En modo remoto o distribuido los datos ingresados al PC son enviados a una Interfaz de usuario mediante una comunicación USB. Una vez recibida la información se envía al módulo inalámbrico mediante una comunicación serial USART. Este módulo de

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

transmisión de información se comunica con un módulo de recepción inalámbrico (XBEE-PRO) ubicado en la unidad de control de mando, mediante radiofrecuencia que transmite la información recibida a la unidad de control del mando mediante una comunicación serial USART.

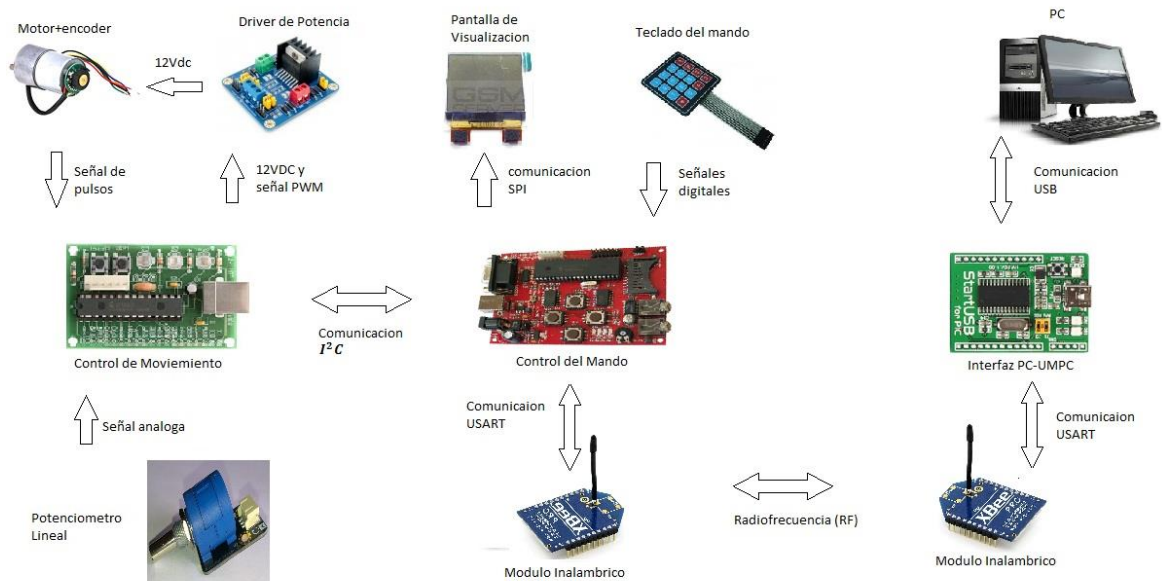


Figura 21. Distribución eléctrica y electrónica de la ayuda técnica tele-asistida.

Arquitectura del sistema modo distribuido disperso

Para el modo distribuido disperso el sistema de rehabilitación presenta la arquitectura de la figura 22 Donde, un médico especialista pueda atender a un paciente con discapacidad transitoria de que se encuentra geográficamente distante.

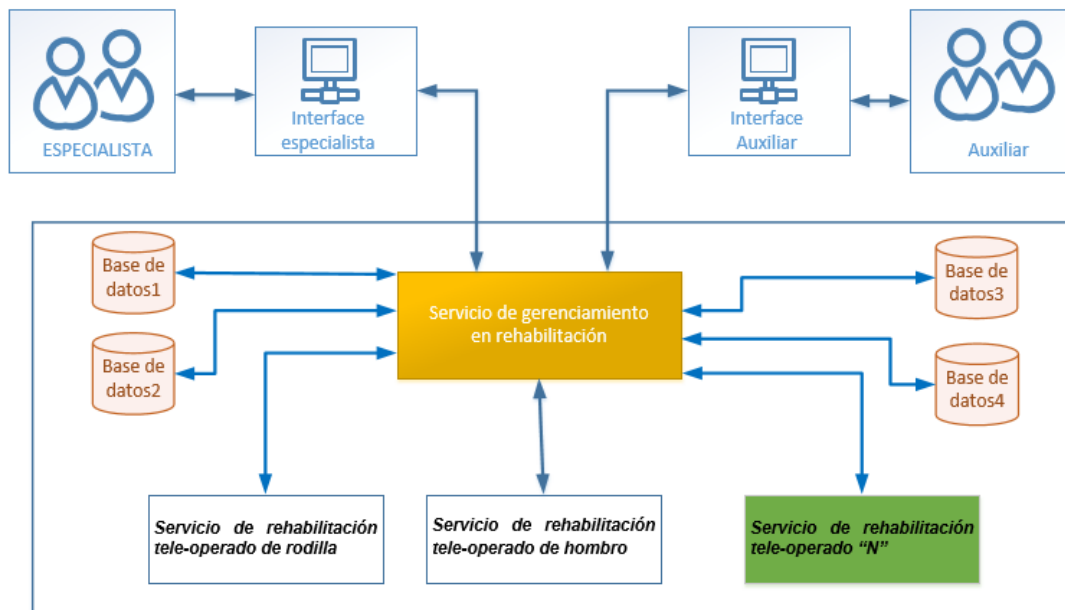


Figura 22. Arquitectura con Orientación a Servicios que integra la ayuda tecnológica para rehabilitación de hombro

Diagrama de Casos de uso del Servicio de gerenciamiento en rehabilitación

En la Figura 23 se presenta el diagrama de casos de uso del servicio de gerenciamiento en rehabilitación del hombro, el cual relaciona: especialista, coequipero y el servicio de rehabilitación tele-operado "N", se muestra la interacción de los eventos y sus actores.

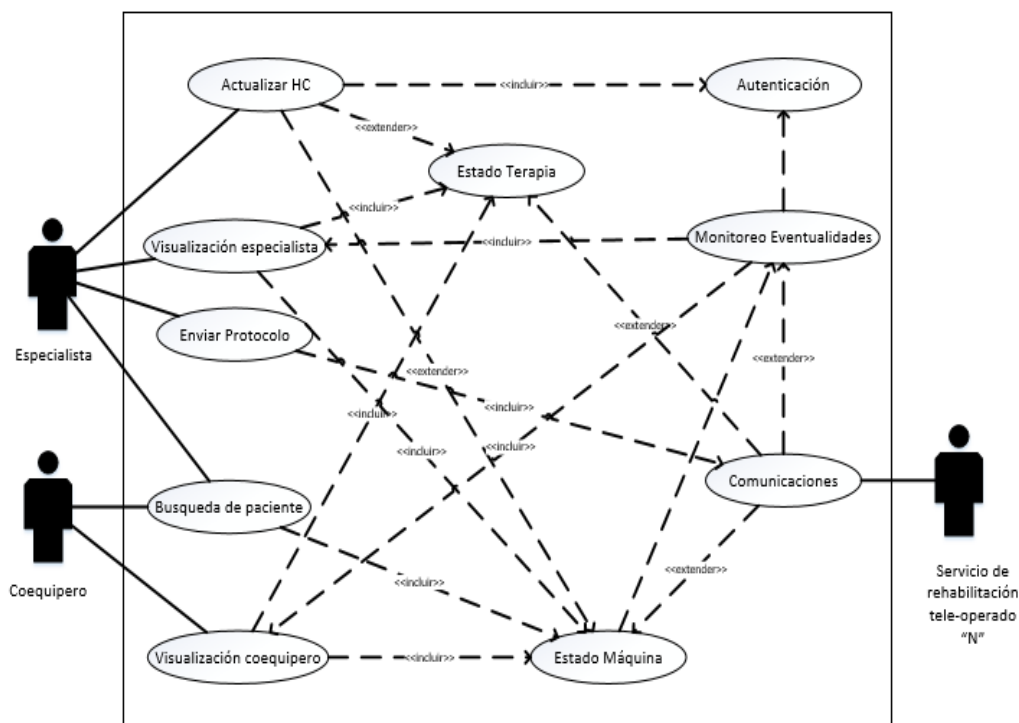


Figura 23. Casos de uso del sistema de rehabilitación tele-operado

En la figura 24 se presenta el diagrama de actividades para la prestación de un servicio de rehabilitación tele-operado, en el cual se indican las acciones asíncronas con líneas punteadas y las acciones síncronas con líneas continuas. Este diagrama también permite comprender la secuencia de los eventos y su incidencia en el flujo de información.

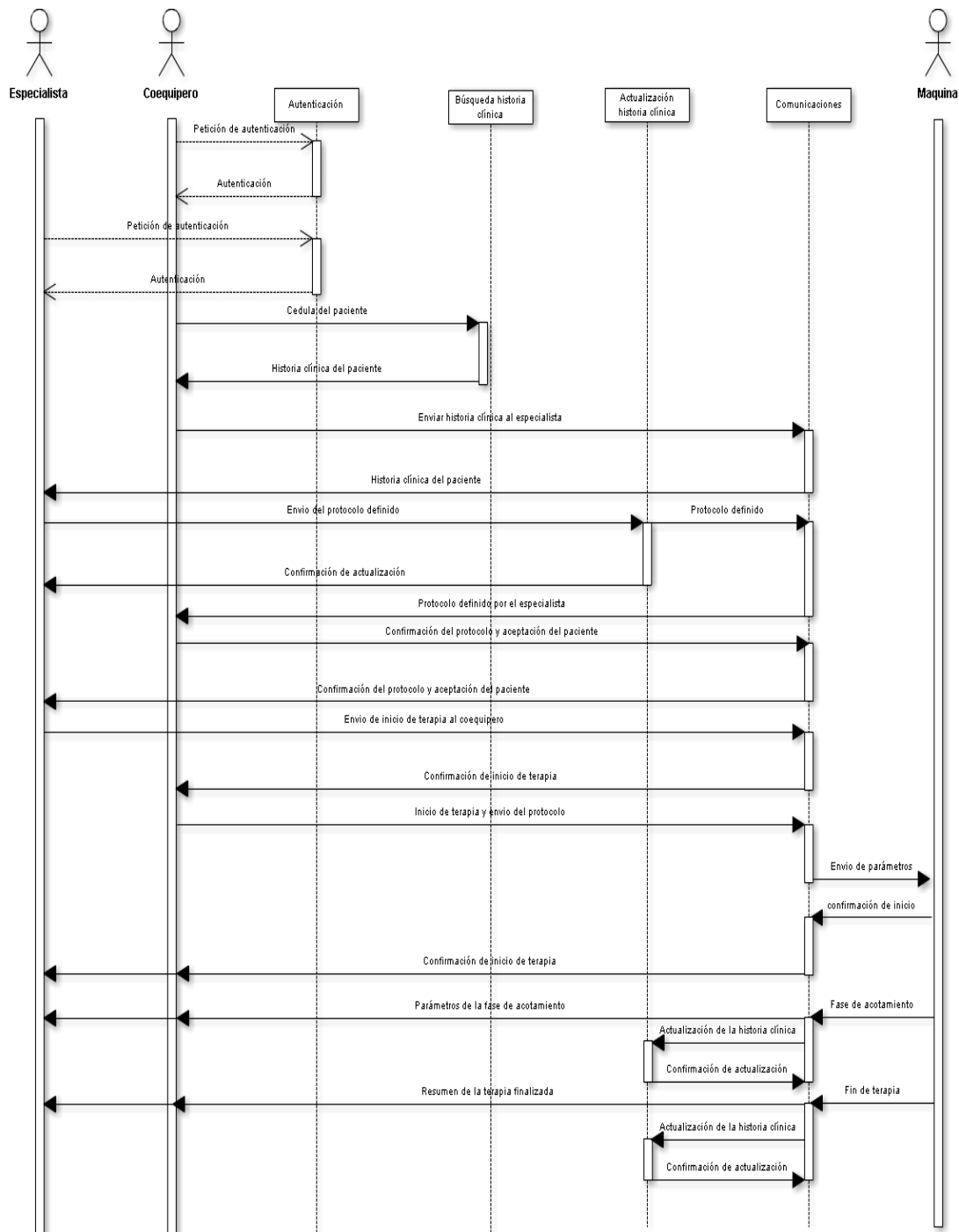


Figura 24. Diagrama de eventos en el sistema de rehabilitación tele-operado.

Debido que el gerenciamiento del sistema de rehabilitación requiere de información suministrada por la base de datos base de datos, se clasifica esta información de la siguiente manera:

- Historia clínica, la cual contiene la información que el médico necesita para diagnosticar y tratar al paciente. También se guarda la información que el medico considera importante para entregar su concepto profesional teniendo como objetivo la recuperación del paciente.
- La evolución del paciente, esta información se registra en un espacio de memoria donde se almacenan los datos referentes a las terapias que se han realizado por medio de telemedicina. Estos datos son importantes, ya que el medico puede procesarlos para analizar el comportamiento de la rehabilitación mediante su trazabilidad.

Simulación en redes de Petri para validar la arquitectura del sistema del para rehabilitación tele-operada.

La arquitectura propuesta se modelo en redes de Petri para comprobar su validez bajo condiciones dinámicas de funcionamiento. Se simularon los servicios de rehabilitación para diferentes situaciones y combinaciones de operación con el fin de observar la respuesta del sistema ante estas condiciones, lo cual permitió validar la robustez de la seguridad del paciente durante la terapia.

Una vez concebida la arquitectura del sistema de rehabilitación tele-operada y debido a la característica estática de la arquitectura, se debió simular el sistema propuesto con redes de Petri coloreadas, se utilizó esta herramienta debido a que es una herramienta grafica – formal, esta simulación permitió ver el comportamiento del flujo de información del sistema al momento de prestar un servicio de rehabilitación tele-operada.

Las redes de Petri coloreadas tienen la particularidad que se pueden asignar colores para diferenciar variables y esto permite crear funciones específicas para el sistema a simular.

En la figura 25 se presenta el listado de colores definidos para el modelo en redes de Petri coloreadas del sistema de rehabilitación tele-operado, estos colores se definieron para identificar y diferenciar variables de acuerdo a su tipo, al momento que se presenta el flujo de información entre el lugar geográfico uno y el lugar geográfico dos.

.

```

▼ Standard declarations
▼ colores
  ▼ colset UNIT = unit;
  ▼ colset BOOL = bool;
  ▼ colset INT = int;
  ▼ colset IP=int with 10000..13000;
  ▼ colset STRING = string;
  ▼ colset AMIN=int with ~90..10;
  ▼ colset AMAX=int with 20..140;
  ▼ colset REPETICION=int with 10..100;
  ▼ colset RESTA= int with 1..60;
  ▼ colset TM= int with 1..4;
  ▼ colset IDL= int with 1..2;
  ▼ colset DATOS=product INT*INT*INT*INT*INT*INT*INT*INT;
  ▼ colset ACTUALIZACION=product STRING*INT*INT*INT*INT*INT*INT*INT*INT;
  ▼ colset REGISTRO= list DATOS;
  ▼ colset REGISTRADOS= list INT;
  ▼ colset PAR= product INT*INT*INT;
  ▼ colset SENAL= product INT*UNIT;
  ▼ colset ENTEROS= product STRING*INT*INT;
  ▼ colset INFO=product INT*STRING;
  ▼ colset ESTADO=product STRING*INT*STRING;
  ▼ colset INFOAUX=product INT*INT*INT*INT*INT*INT;
  ▼ colset PROTOCOLO=product STRING*INT*INT*INT*INT*INT*INT;
  ▼ colset EVENTUALIDAD= product INT*STRING*STRING*STRING;
  ▼ colset AUX= product INT*STRING*STRING;
  ▼ colset VALORACION=product STRING*INT*STRING*STRING;
  ▼ colset VALIDAR= product INT*INT*STRING;
  ▼ colset UNION= union estado:STRING+protocolo:DATOS;
  ▼ colset RECEPCION2= union texto:STRING+inf:INFO+cond:ESTADO+
    aux:INFOAUX+coequip:AUX+valorar:VALORACION+unidad:UNIT+senal:SENAL+dato:PROTOCOLO;
  ▼ colset RECEPCION= union recepcion:RECEPCION2+
    D:DATOS+actualizar:ACTUALIZACION+solicitud_HC:INT+reg:REGISTRO
    +numeros:ENTEROS + validar:VALIDAR;

```

Figura 25. Listado de colores definidos en el modelado de redes de Petri

En la figura 26 se presenta la red de Petri general del sistema, en el lugar geográfico 1 se modelo la transición de sustitución del “PC ESPECIALISTA”. En el lugar geográfico 2 se modelaron las transiciones de sustitución “PC COEQUIPERO” – “MAQUINA RODILLA” - “MAQUINA HOMBRO”. Estos dos lugares geográficos se encuentran unidos por lo que se denominó a la transición de sustitución “INTERNET”.

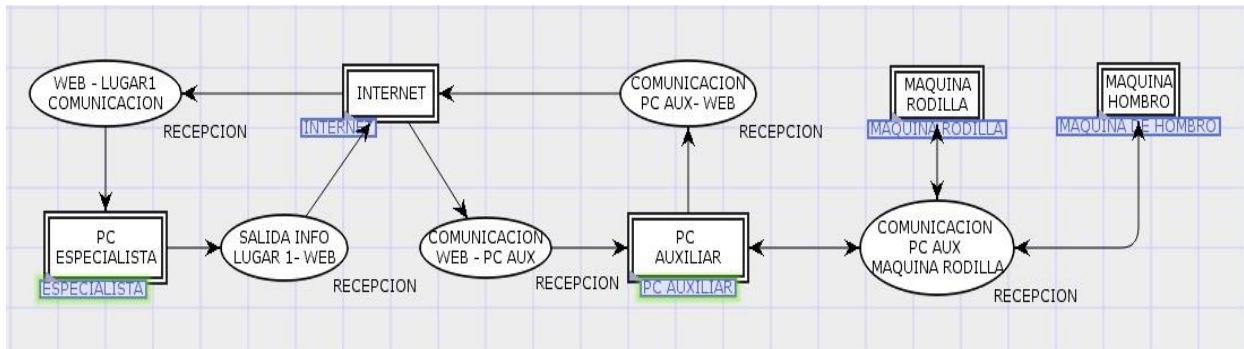


Figura 26. Red de Petri coloreada general del sistema de tele-operación para rehabilitación.

Cada una de las transiciones de sustitución está interconectadas con lugares que simulan la entrada y salida de información entre las interfaces de usuario. Cada transición de sustitución contiene otras redes de forma anidada que simulan los procesos internos del sistema de rehabilitación.

La función principal de la simulación del sistema es analizar el comportamiento del sistema en sus condiciones más críticas y que garanticen la seguridad del paciente ante cuatro eventualidades: i) rechazo del protocolo al inicio de terapia, ii) eventualidad por inspección visual del coequipero a la máquina, iii) eventualidad por mal funcionamiento interno de la máquina, iv) eventualidad grave durante terapia.

Además, se consideró en el modelado los servicios definidos en los servicios web para ser evaluados y verificar su comportamiento en el sistema de rehabilitación tele-operado, los cuatro servicios modelados son: autenticación de especialista – coequipero, búsqueda de pacientes, actualización historia clínica paciente y comunicación. En la figura 27 se presentan los servicios en redes de Petri.

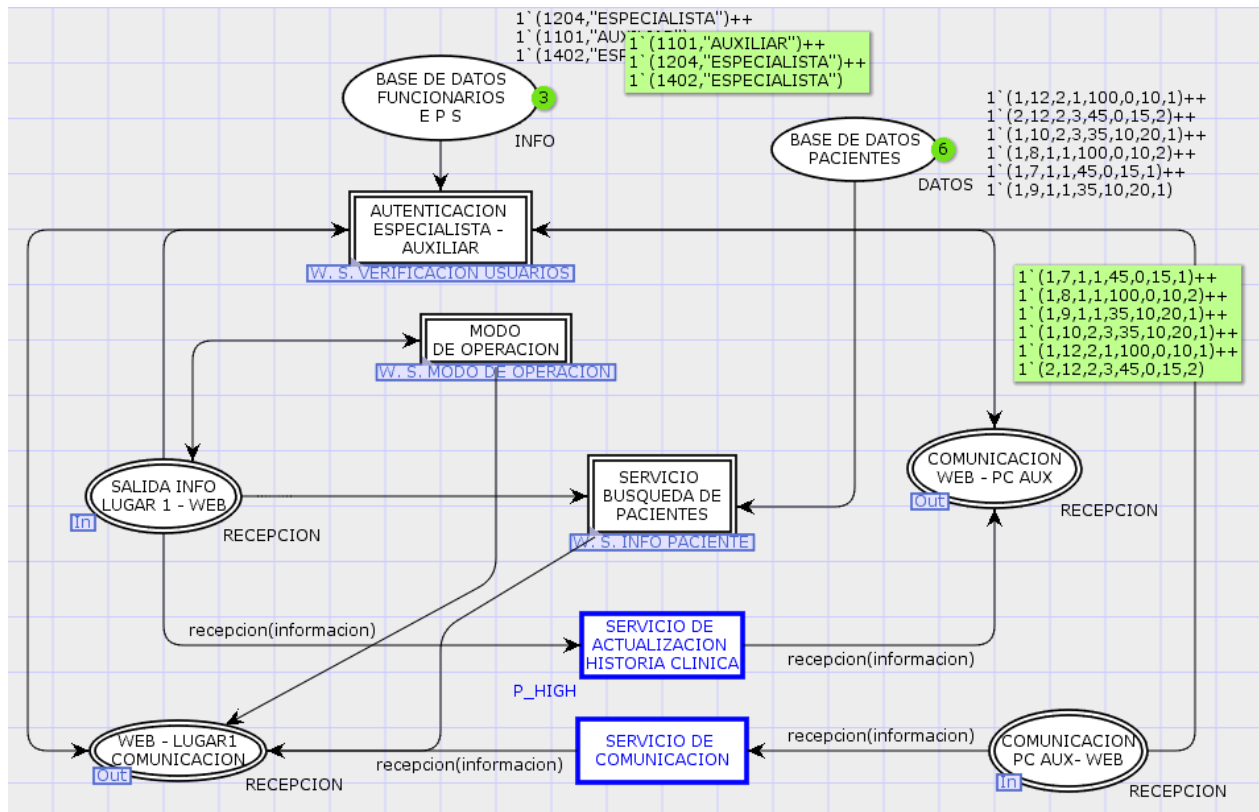


Figura 27. Modelado de los servicios web

Se utilizó una base de datos de los pacientes y de los funcionarios aproximada a la realidad en cuanto al uso de las bases de datos del sistema de salud, la información contenida en cada registro de los pacientes contiene un registro con una lista de los datos que deben actualizarse en la historia clínica del paciente.

Estructura del sistema tele-operado para rehabilitación modelado en Redes de Petri coloreadas.

A continuación, se muestra la estructura del modelo con sus respectivas transiciones y sus relaciones jerárquicas.

GENERAL

ESPECIALISTA

RECEPCION Y ENVIO INFO ESPECIALISTA

VINCULAR PACIENTE

DEFINICION DE PROTOCOLO

PLANTEAR PROTOCOLO

FLEXO-EXTENSION

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

ABDUCCION
ADUCCION
ROTACION INTERNA Y EXTERNA
FLEXO-EXTENSION RODILLA

EVENTUALIDADES AL INICIO

PROCESO DE EVENTUALIDAD INICIAL

TIPO DE OPERACIÓN
ENTRADA INFORMACION
SALIDA INFORMACION

INTERNET

AUTENTICACION
BUSQUEDA PACIENTE
ACTUALIZACION HISTORIA CLINICA
COMUNICACIÓN MAQUINA

MAQUINA RODILLA

ENCENDER O APAGAR MAQUINA RODILLA
RECEPCION Y ACOTADO PROTOCOLO
ACTIVAR MODO DE TERAPIA
REVISAR COMUNICACIONES PC-MAQUINA
MAQUINA DE REHABILITACION EN OPERACIÓN
ESTADO MAQUINA DE RODILLA

MAQUINA HOMBRO

ENCENDER O APAGAR MAQUINA HOMBRO
RECEPCION Y ACOTADO PROTOCOLO
ACTIVAR MODO DE TERAPIA
REVISAR COMUNICACIONES PC-MAQUINA
MAQUINA DE REHABILITACION EN OPERACIÓN
ESTADO MAQUINA DE HOMBRO

PC AUXILIAR

REGISTRAR Y ENCENDER MAQUINA
EVALUAR CONEXIÓN PC-MAQUINA
ENVIO INFORMACION DESDE AUXILIAR
EVALUAR VISUALMENTE PACIENTE Y MAQUINA
SOCIALIZACION PROTOCOLO

Las transiciones que se muestran en negrilla indican que son de sustitución, lo que significa que tienen redes anidadas en ellas mismas.

Evaluación y análisis de las eventualidades del sistema

Para analizar y evaluar las eventualidades del sistema de rehabilitación tele-operada se incluyó en el modelo de redes de Petri coloreadas, monitores que permiten identificar estas eventualidades de acuerdo a los eventos que se presenten y una vez estos eventos suceden se deben cumplir una secuencia de otra serie de eventos, estas series de eventos está definida por la arquitectura del sistema.

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

En la figura 28 se presenta el listado de monitores implementados en el modelo de redes de Petri.

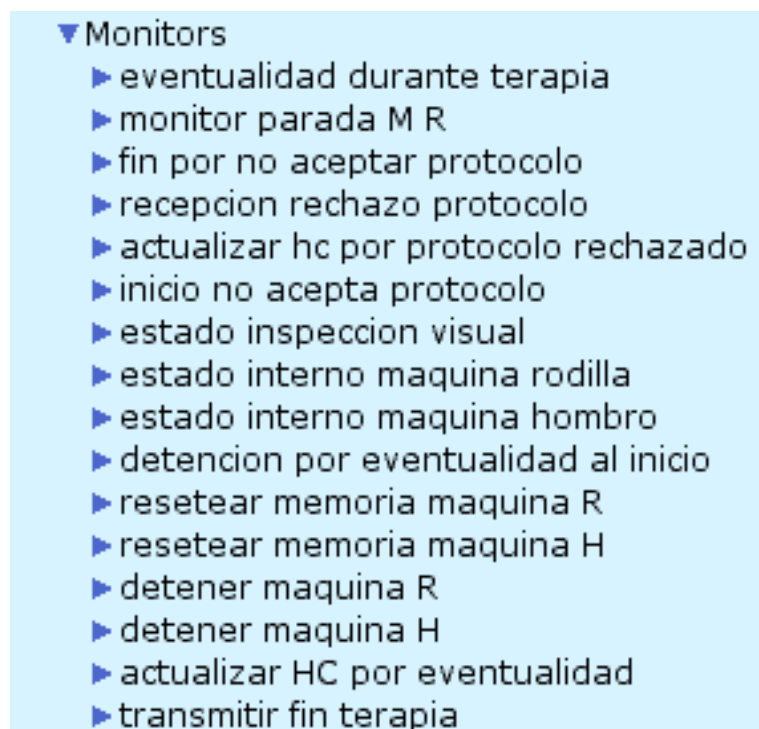
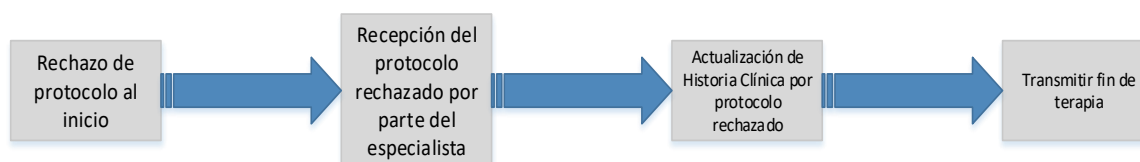


Figura 28. Monitores del modelo en redes de Petri

A continuación, se presenta el comportamiento de todos los servicios definidos en la arquitectura, la simulación de los modos de operación del sistema y la respuesta del sistema responde ante eventualidades que ponen en peligro al paciente, las posibles eventualidades consideradas son:

Eventualidad: Rechazo de protocolo por parte del paciente al inicio de la terapia, cuando se presenta esta eventualidad el sistema realiza el protocolo que se muestra en la figura 29.



Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

Figura 29. Rechazo de protocolo al inicio de la terapia.

Para observar el comportamiento del sistema en la simulación se observadores en las transiciones que identifican cada uno de estos pasos, en la Figura 30 se presenta la sub-red de Petri que modela estos eventos.

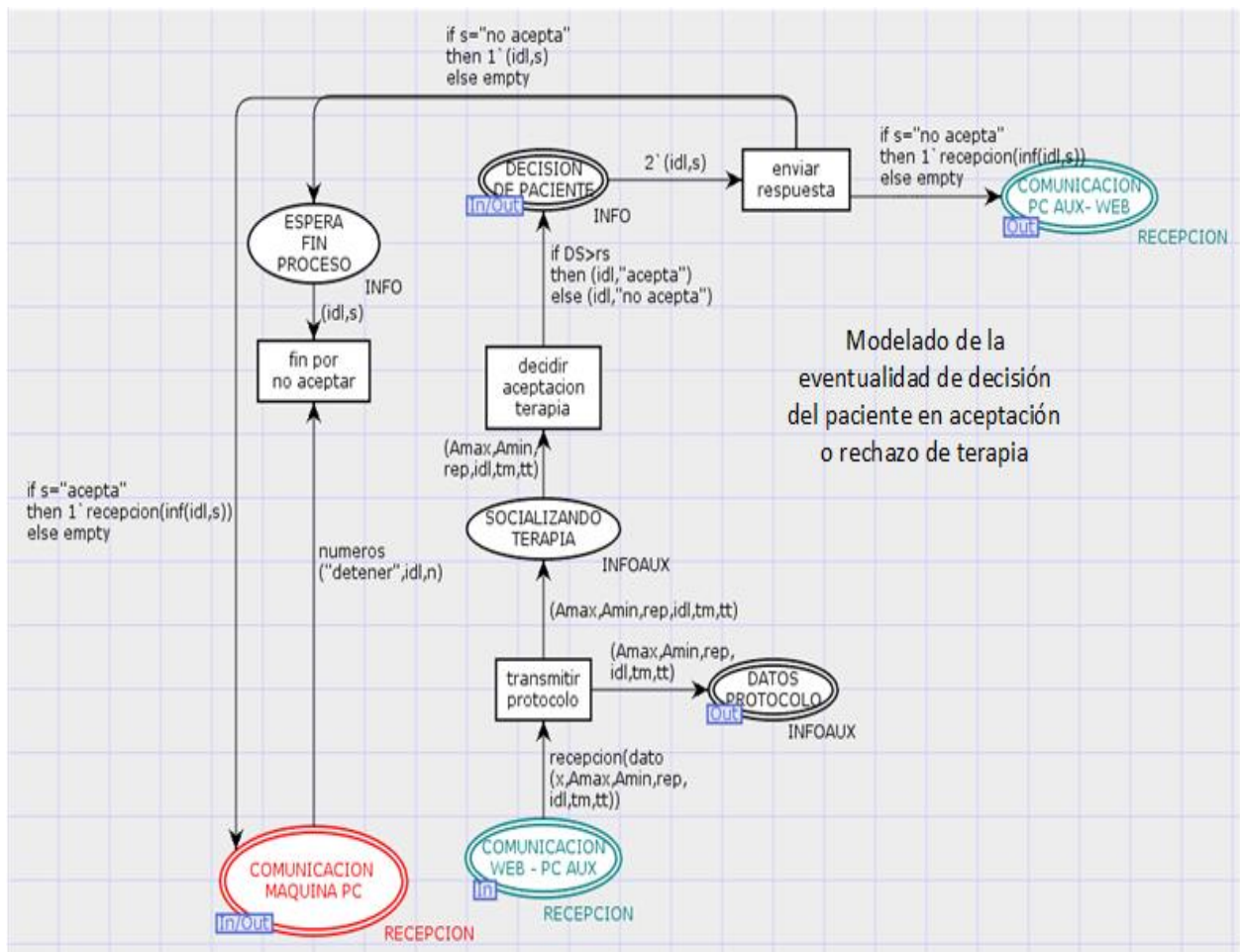


Figura 30. Modelado de eventualidad rechazo al inicio de la terapia

En la tabla 11 se ilustran los resultados del sistema tele operado a esta eventualidad.

Tabla 11. Resultados del modelado del sistema ante el rechazo del protocolo al inicio.

inicio no acepta protocolo	Recepción del protocolo rechazado por parte del especialista	Actualizar historia clínica por protocolo rechazado	Transmitir fin de terapia
step	step	step	step
297	300	301	305
300	303	304	308
471	474	475	479

En la tabla 11 se evidencia el comportamiento del sistema ante la eventualidad, ya que las transiciones definidas por el protocolo se presentan en forma secuencial, como se puede ver en la tabla 11 los eventos se presentan de manera progresiva una vez sucede la eventualidad, lo que garantiza que el sistema se comporta como fue diseñado.

Eventualidad: Estado de la máquina, esta eventualidad evalúa la condición externa de la máquina por parte del coequipero y la evaluación interna de funcionamiento de la máquina, en la figura 31 se presenta el protocolo que debe realizar el sistema ante una eventualidad detectada visualmente por el coequipero.

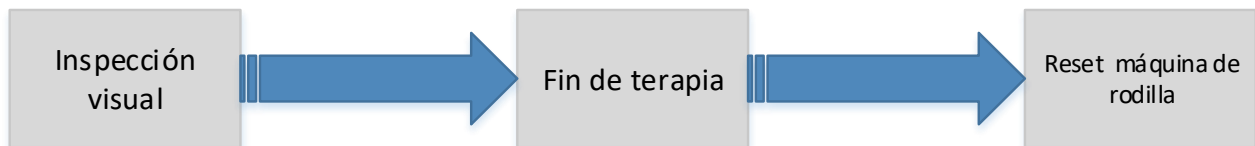


Figura 31. Eventualidad detectada visualmente por el coequipero

En la figura 32 se presenta modelado la inspección de la máquina, el modelado contempla todas las posibilidades que se pueden presentar al momento de la inspección

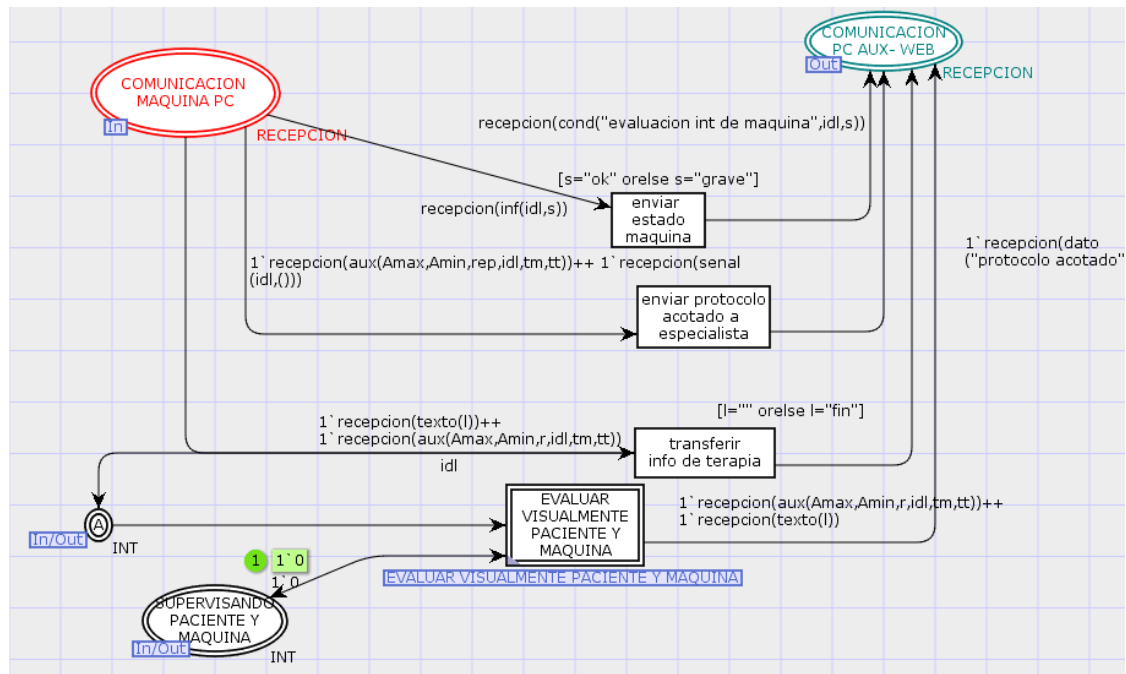


Figura 32. Modelado de la eventualidad detectada visualmente

En la tabla 12 se presentan los resultados de la simulación cuando se presenta alguna eventualidad en la inspección visual por parte del auxiliar, cuando se registra la eventualidad, los eventos siguientes deben ser fin de terapia y reset de máquina.

Tabla 12. Resultados simulación de la Inspección visual por parte del coequipero

inspección visual	fin terapia	reset maquina
step	step	step
99	116	121
237	247	252
414	429	434

Eventualidad: Estado interno máquina, el protocolo que se debe ejecutar ante la eventualidad interna de la máquina se muestra en la figura 33.

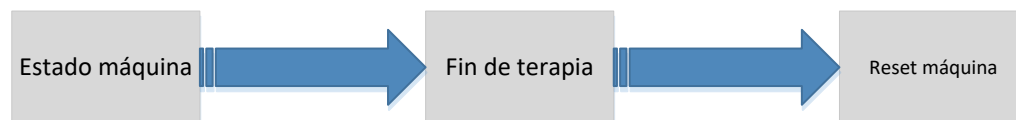


Figura 33. Protocolo ante eventualidad en el funcionamiento interno de la máquina.

A continuación, en la figura 34 se presenta el modelado de la eventualidad de estado interno de la máquina.

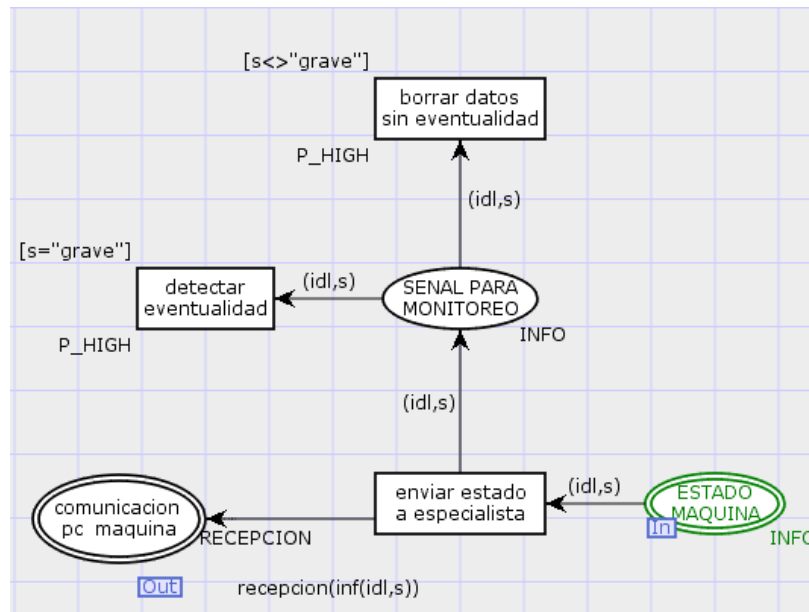


Figura 34. Eventualidad estado interno máquina.

En la tabla 13 se presentan los resultados de la simulación ante la posible eventualidad de daño interno de la máquina. Para prevenir algún tipo de riesgo en el paciente se definieron los eventos siguientes de estado interno de máquina como: fin de terapia y reset máquina, en la tabla 13 se puede ver que estos eventos cumplen con lo diseñado.

Tabla 13. Reacción ante eventualidad en el estado interno de la máquina.

estado maquina rodilla	fin terapia	Reset máquina
step	step	step
61	78	82
241	252	256

Eventualidad: eventualidad grave durante terapia, esta eventualidad considera la caída de conexión de internet y falla en el fluido eléctrico de la máquina, el protocolo que el sistema debe seguir se presenta en la figura 35.

En la figura 35 se presenta el modelado de la eventualidad durante terapia a implementar en el sistema de rehabilitación.

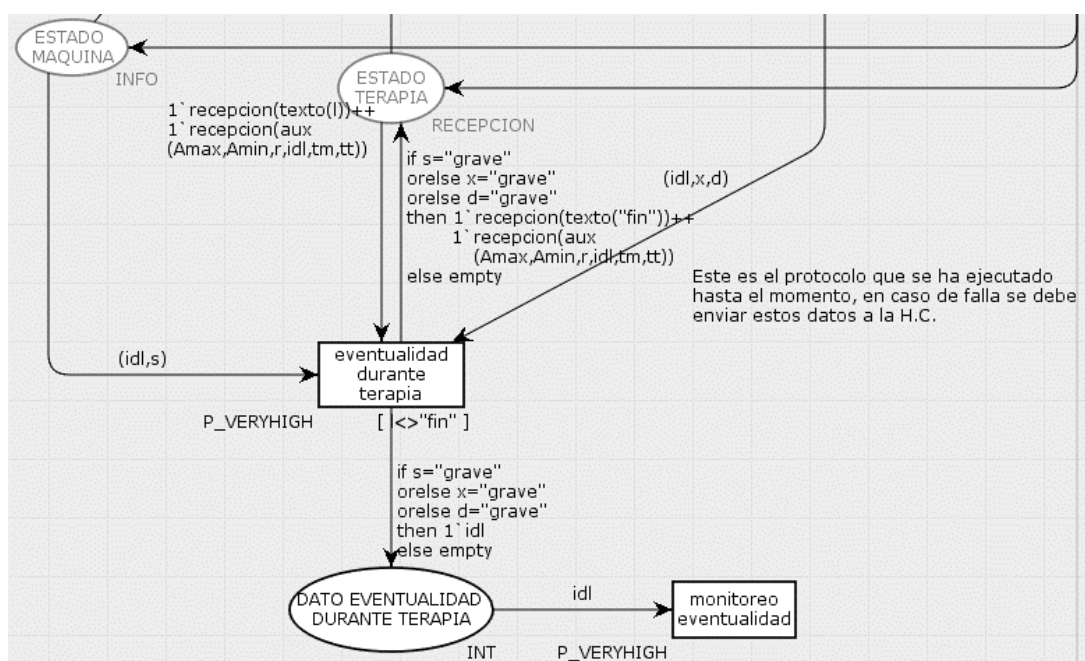


Figura 35. Eventualidad durante terapia

En la Figura 36 se ilustra el protocolo que se debe ejecutar ante la eventualidad grave durante la terapia interna.

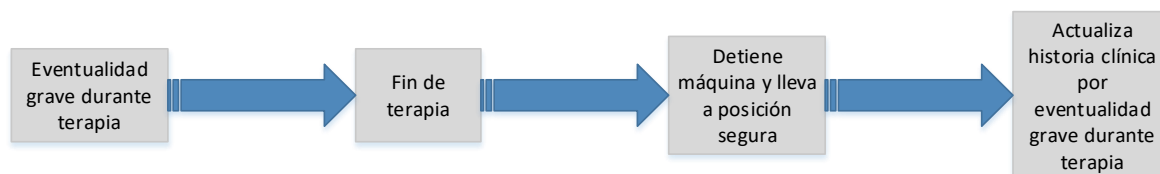


Figura 36. Protocolo a seguir ante eventualidad grave durante terapia.

Los resultados de la simulación se presentan en la tabla 14, en la cual se indican cada uno de los pasos que se deben cumplir en el protocolo definido.

En la tabla 14 se presenta los resultados arrojados por la herramienta de simulación que permite establecer si los eventos se presentan de manera consecutiva, lo que garantiza que una vez presentada la eventualidad se cumple con el protocolo definido en función de proteger la seguridad del paciente.

Tabla 14. Respuesta del sistema ante eventualidad grave en terapia.

eventualidad durante terapia	fin terapia	detiene maquina	actualizar hc x evento
step	step	step	step
514	517	520	522
113	116	121	127
253	257	264	305
426	429	436	476

Modelo en Redes de Petri Coloridas de la máquina de rehabilitación de hombro teleoperada

El funcionamiento de la máquina de hombro se diferencia de la de rodilla en cuanto a sus grados de libertad, el hombro tiene tres grados de libertad, cada grado de libertad tiene asociado dos movimientos anatómicos, los cuales son: rotación interna y rotación externa, abducción y aducción y por último flexo-extensión. Además, estos movimientos anatómicos tienen unos alcances máximos y mínimos definidos por la biomecánica de la articulación y las AVD. En la Figura 37 se ilustra el modelado de la máquina de rehabilitación del hombro en función de los movimientos de rehabilitación y sus alcances.

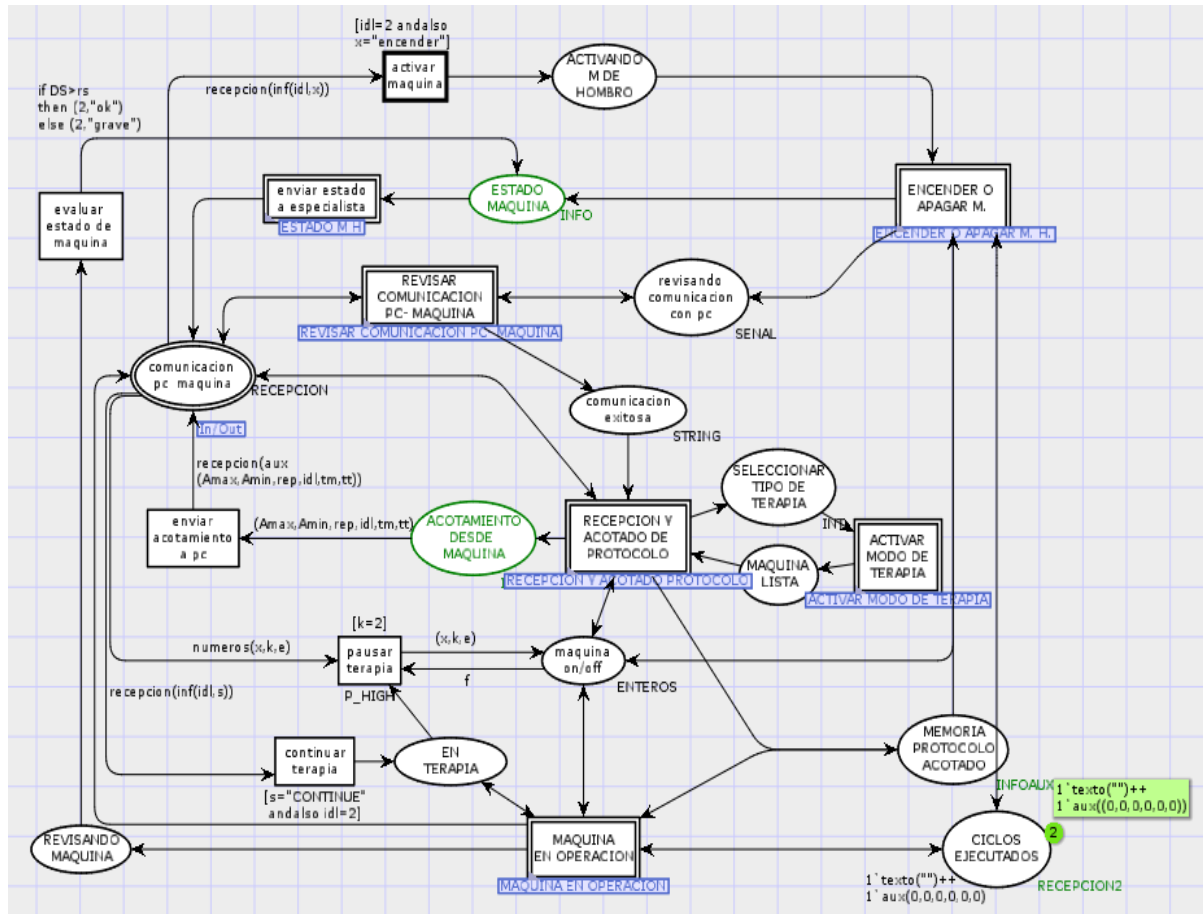


Figura 37. Modelo general de la máquina de rehabilitación de hombro tele-operada.

Se realizaron simulaciones relacionadas con: los protocolos de rehabilitación y tipo de rehabilitación, condiciones que garantizan la seguridad del paciente y que permiten verificar el comportamiento del sistema ante la presencia de situaciones anómalas de operación.

En la figura 38 se presenta el modelo de los protocolos de la máquina de hombro y cada uno de los modelos de los movimientos requeridos para la rehabilitación, se concibió considerando la modularidad de las máquinas en cuanto al acoplamiento a la arquitectura planteada. La rehabilitación de cada articulación se diferencia en dos aspectos: grados de libertad y ángulos máximos de alcance.

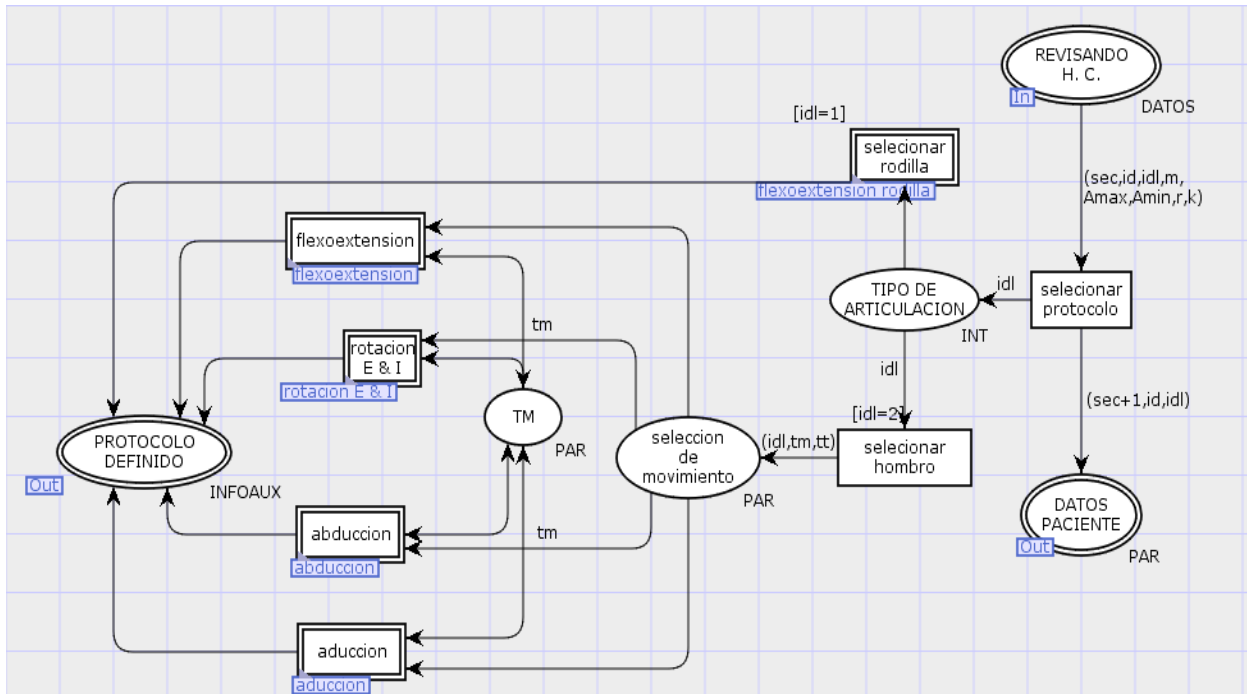


Figura 38. Modelo de los movimientos a rehabilitar por la máquina de hombro

En la figura 39 se observa cada uno de los movimientos anatómicos que puede realizar la articulación de hombro, estos movimientos están definidos en tres grados de libertad, los cuales se modelan como transiciones de sustitución, las cuales se presentan en la figura 40 para ver el detalle del modelo que se desarrolló para garantizar el funcionamiento y seguridad del sistema propuesto.

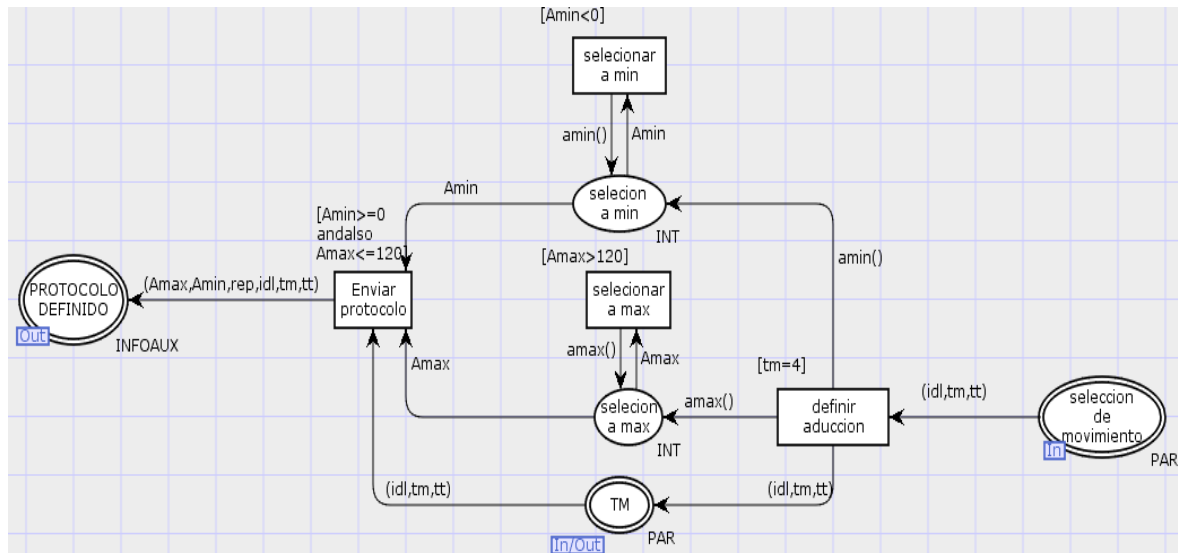


Figura 41. Aducción para hombro

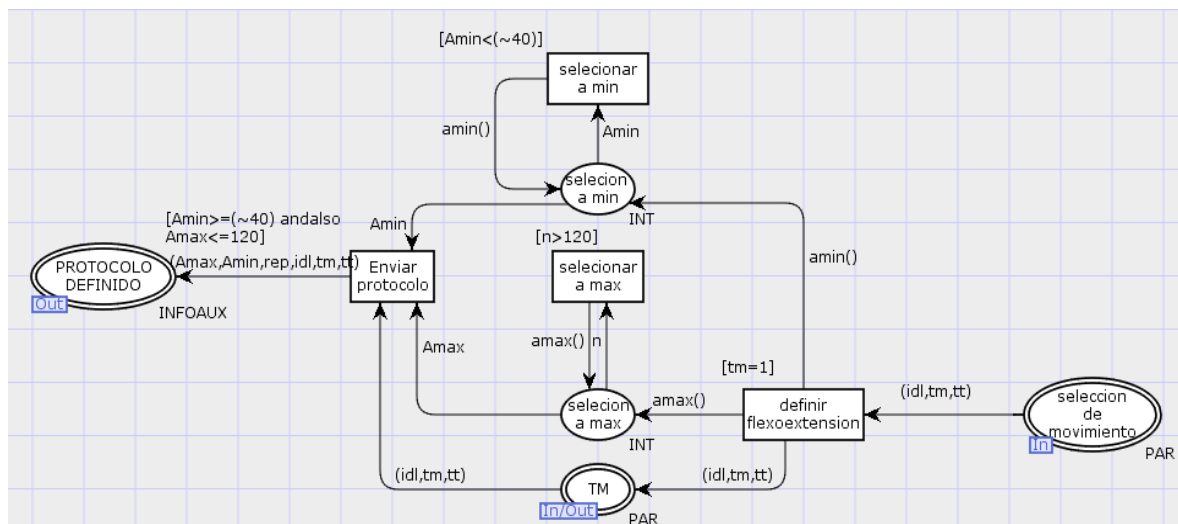


Figura 42. Flexo extensión hombro

Estas simulaciones permitieron validar las diferentes condiciones de operación de la máquina y de esta manera poder determinar si los criterios de seguridad para los ángulos de movimiento de la articulación son los adecuados, de acuerdo a los ángulos anatómicos definidos por la biomecánica de la articulación.

Los ángulos están restringidos por funciones o colores definidos en las redes de Petri los cuales no permiten que el especialista defina un protocolo de rehabilitación por fuera de estos rangos.

CAPITULO 3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes del proyecto: el prototipo, los resultados de las pruebas de funcionamiento, interface de usuario y los resultados de formación y difusión.

3.1. Prototipo

3.1.1 tarjeta de seguridad

La tarjeta que se muestra en la figura 43 es la encargada de estar en interacción con el usuario, consta de 2 botones (start/pause y acotar), 4 indicadores lumínicos, una alarma sonora (buzzer), una pantalla grafica a color de 1,8", un módulo Xbee-pro y un microcontrolador PIC18F452.

Esta etapa establece una comunicación con la etapa de control utilizando el protocolo de comunicación I^2C , el cual tiene la posibilidad de conectar hasta 128 dispositivos utilizando solo dos cables para dicha comunicación, se debe contar con un dispositivo maestro que en este caso es el microcontrolador de la etapa del sistema de seguridad, los demás dispositivos que se agreguen al bus de comunicación se comportan como esclavos. Para el funcionamiento correcto de los dispositivos presentes en esta etapa se cuenta con dos niveles de voltaje, uno de 5VDC para la alimentación del microcontrolador, leds, teclado de membrana y el buzzer, y el segundo nivel de tensión es de 3.3VDC el cual alimenta la pantalla de visualización y el modulo inalámbrico Xbee-Pro.

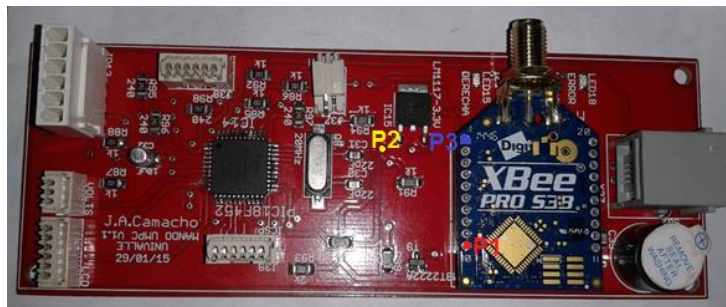


Figura 43. tarjeta de seguridad

3.1.2 tarjeta de control

Esta tarjeta que se muestra en la figura 44, se encarga del movimiento del sistema de potencia y el sensado de lo posición de la misma; para realizar la medición de la posición se realiza por medio del potenciómetro lineal, el cual está conectado a una entrada analógica del microcontrolador, para determinar la velocidad a la cual está girando el motor, se utiliza un encoder relativo el cual entrega un número de pulsos digitales proporcionales a la velocidad giro del motor.



Figura 44. Tarjeta de control

Para realizar el control del movimiento, se debe realizar la comunicación con la etapa de control de mando mediante el protocolo de comunicación I^2C , la cual recibe los parámetros de terapia ajustados por el profesional de la salud, así como las ordenes de inicio, pausa, parada y posicionamiento, además esta etapa retorna el ángulo en que se encuentre el sistema de potencia y los estados de error, en tal caso si se presenta un error en el funcionamiento como medida de prevención esta etapa detiene el funcionamiento del motor, con el fin de garantizar la integridad física del paciente.

3.1.3 driver de potencia principal

El driver de potencia, que se presenta en la figura 45, es el encargado de suministrar la tensión necesaria para el funcionamiento del motor eléctrico, la cual cuenta con un puente H integrado LMD18200T, que permite variar el nivel de tensión que se le vaya a suministrar al motor mediante la técnica de modulación de ancho de pulso PWM, la cual consiste en aumentar o disminuir el tamaño de los pulsos de una señal digital cuadrada sin modificar su frecuencia, si este pulso se aplica a la base de un transistor BJT o la compuerta de un transistor de efecto de campo como son los JFET y MOSFET, provoca que el transistor funcione como un interruptor controlado y de esta manera se puede controlar la potencia entregada a una carga, en este caso la carga utilizada es el motor eléctrico, al controlar la potencia a dicho motor, se refleja en la velocidad de giro, es decir a mayor potencia suministrada mayor será la velocidad de giro.

La etapa encargada de realizar el control de este driver es la encargada del control de movimiento.



Figura 45. Driver de potencia principal

3.1.4 tarjeta de acondicionador

Esta etapa es la encargada de recibir las señales provenientes de los sensores de posición, encoder y fuerza, y ajustarlas a los niveles de voltaje necesarios para la correcta adquisición de las señales, para luego ser digitalizadas por el microcontrolador. En la figura 46 se presenta la tarjeta de acondicionador.



Figura 46. Tarjeta de acondicionador

3.1.5 driver solenoide

La función del driver solenoide es la activación o desactivación del solenoide utilizado para el cambio de terapia activa y pasiva, este driver es controlado por la etapa de control la cual envió un pulso digital para la activación o desactivación del dispositivo. Soporta un solenoide de 24Vdc a 1A, además como medida de protección con la tarjeta de control y el solenoide cuenta con un opto acoplador que separa la parte de control con la de potencia, en la figura 47 se presenta el driver del solenoide.



Figura 47. Driver del solenoide

3.2 Protocolos de pruebas de las tarjetas electrónicas

Las siguientes tablas hacen referencia a los protocolos de pruebas que fueron sometidas las tarjetas electrónicas antes de ser montadas en la unidad de potencia.

Tarjeta de seguridad.

Tabla 15 Protocolo de pruebas tarjeta de seguridad

<i>Prueba</i>	<i>Tipo de Resultado</i>	<i>Resultado obtenido</i>
Verificación de voltaje de 5V (P1-P2)	%error	5.01V
Verificación de voltaje de 3.3V (P1-P3)	%error	3.29V
Comunicación entre las tarjetas (control - seguridad)	Si/no	Si
Sistema de seguridad ante simulación de falla del sensor de posición	Cumple, no Cumple	Cumple
Sistema de seguridad ante simulación de falla del sensor de velocidad	Cumple, no Cumple	Cumple
Sistema de seguridad ante simulación de falla del sensor de fuerza	Cumple, no Cumple	Cumple
Sistema de seguridad ante simulación de la pérdida de comunicación	Cumple, no Cumple	Cumple
Sistema de seguridad ante simulación de falla del motor	Cumple, no Cumple	Cumple
Alcance máximo de la comunicación entre la máquina y el pc	Rango disponible (m)	
Cumplimiento de la programación	Cumple, no Cumple	Cumple

Tarjeta de control principal.

Tabla 16 Protocolo de pruebas tarjeta de control principal.

<i>Prueba</i>	<i>Tipo de Resultado</i>	<i>Resultado obtenido</i>
Verificación de voltaje de 5V (P1-P2)	%error	5.01V
Verificación de referencia de 2.5V (P1-P3)	%error	2.562V
Comunicación entre las tarjetas (control - seguridad)	Si/no	SI
Comunicación entre las tarjetas (control – driver de potencia)	Si/no	SI

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

Comunicación entre las tarjetas (control – acondicionador)	Si/no	SI
Comunicación entre las tarjetas (control – driver solenoide)	Si/no	Si
Salida PWM de 15Khz (P1-P4)	%error	15.0KHz
Cumplimiento de la programación	Cumple, no Cumple	SI

Driver de potencia principal.

Tabla 17. Protocolo de pruebas driver de potencia principal.

<i>Prueba</i>	<i>Tipo de Resultado</i>	<i>Resultado obtenido</i>
Verificación de voltaje de 24V (P1-P2)	%error	24.02V (0.08%)
Verificación corriente del motor sin carga (P1-P3)	Medición A	0.365 A
Comunicación entre las tarjetas (Driver - control)	Si/no	Si
Inversión de giro (derecha)	Si/no	Si
Inversión de giro (izquierda)	Si/no	Si
Voltaje de 6V con pulso al 25% (P4-P5)	%error	5.79V (3.5%)
Voltaje de 12V con pulso al 50% (P4-P5)	%error	11.67V (2.75%)
Voltaje de 18V con pulso al 75% (P4-P5)	%error	17.43V (3.1%)
Voltaje de 24V con pulso al 100% (P4-P5)	%error	23.00V (4.1%)
Temperatura del driver de potencia	Grados centígrados (°C)	34.3°C

Tarjeta de acondicionador.

Tabla 18 Protocolo de pruebas para la tarjeta de acondicionador.

<i>Prueba</i>	<i>Tipo de Resultado</i>	<i>Resultado obtenido</i>
Verificación de voltaje de 5V (P1-P2)	%error	4.94V (1.2%)
Comunicación entre las tarjetas (acondicionador - control)	Si/no	Si
Rango de medición del sensor de posición (P1-P4)	Rango medible (°)	0 – 360°
Rango de medición del sensor de velocidad (P1-P5)	Rango medible (°/s)	

Rango de medición del sensor de fuerza (P1-P3)	Rango medible (Lb)	0 – 25Lb
--	--------------------	----------

Driver solenoide.

Tabla 19. Protocolo de pruebas para el driver solenoide.

<i>Prueba</i>	<i>Tipo de Resultado</i>	<i>Resultado obtenido</i>
Verificación de voltaje de 5V (P1-P2)	%error	5.07V (1.4%)
Verificación de voltaje de 24V (P3-P4)	%error	24.41V (1.7%)
Comunicación entre las tarjetas (Driver solenoide - control)	Si/no	Si
Accionamiento	Si/no	Si
Temperatura del driver solenoide	Grados centígrados (°C)	61°C

3.2.2 pruebas de velocidad y posición angular de la máquina de rehabilitación de hombro.

La máquina de hombro puede realizar terapia pasiva y activa. En la terapia pasiva las trazabilidades de las terapias realizadas por el paciente se miden de acuerdo a las variables definidas por el especialista en cada protocolo de terapia, entre estas variables tenemos: velocidad con la que se va a mover el miembro inferior durante la terapia (velocidad medida en grados por segundo) y los ángulos que alcanza la máquina en cada terapia.

Para el caso de la rehabilitación activa la trazabilidad del tratamiento se mide en función de la fuerza de resistencia que genera la máquina al paciente.

El terapeuta en cada sesión de rehabilitación deberá definir en el protocolo los valores de referencia para esta variable, la cual debe ser alcanzada por el paciente.

3.2.1 Referencia de velocidad.

La referencia de velocidad estará dada en grados por minuto, sin embargo, el control de la velocidad del motor esta dado en porcentaje de frecuencia, a continuación, se presentan los resultados de las pruebas.

Tabla 20 datos de frecuencia y velocidad angular (giro derecho)

tabla de velocidades máquina hombro			
porcentaje de la frecuencia %	Tiempo (s)	Rev. Por segundos	rad/seg
10			
20			
30			

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

40			
50			
60			
70			
80	4,1	0,244	87,80
90	3,5	0,286	102,86
100	3,2	0,313	112,50

Al realizar la gráfica que relaciona el porcentaje de frecuencia y la velocidad en radianes por segundo, se obtiene la siguiente gráfica:

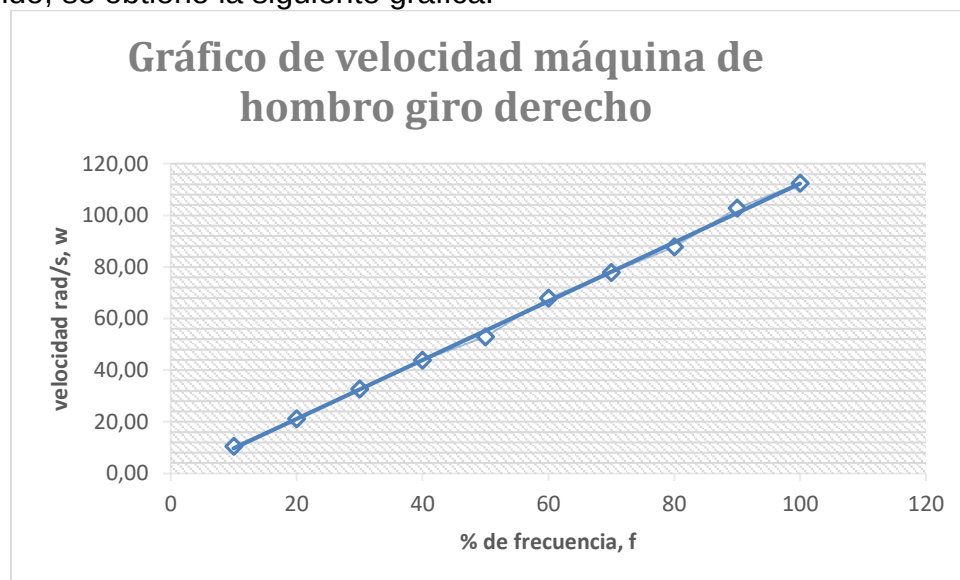


Figura 48. Frecuencia vs velocidad angular giro derecho

Estas mismas pruebas de velocidad se realizaron para el giro izquierdo, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 21. Datos de frecuencia y velocidad angular (giro izquierdo)

tabla de velocidades máquina hombro			
porcentaje de la frecuencia %	tiempo	rps	rad/seg
10	35	0,029	10,29
20	16,9	0,059	21,30
30	11,2	0,089	32,14
40	8,3	0,120	43,37

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

50	6,7	0,149	53,73
60	5,4	0,185	66,67
70	4,5	0,222	80,00
80	4	0,250	90,00
90	3,5	0,286	102,86
100	3,1	0,323	116,13

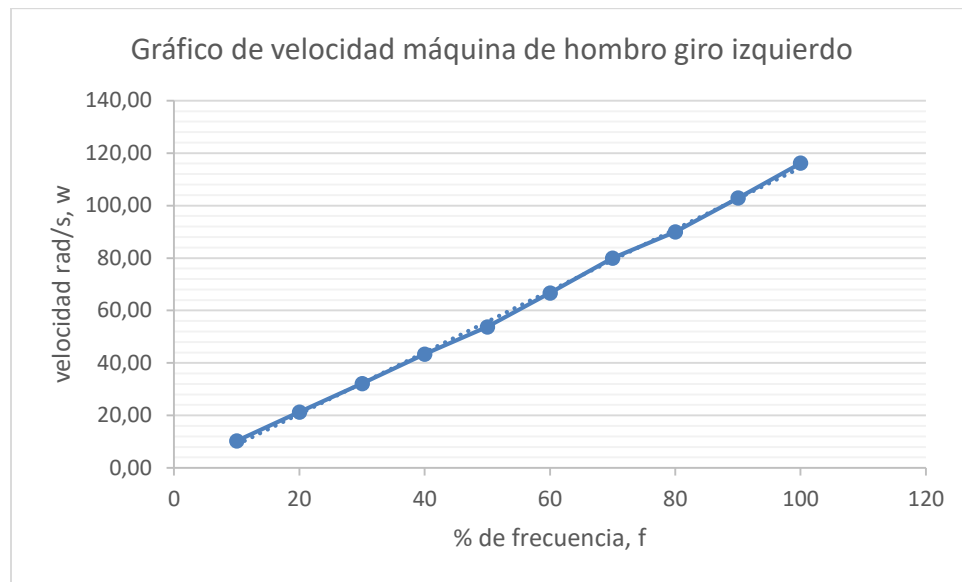


Figura 49. Frecuencia vs velocidad angular giro izquierdo

Diagrama del sistema de velocidad en la máquina de hombro

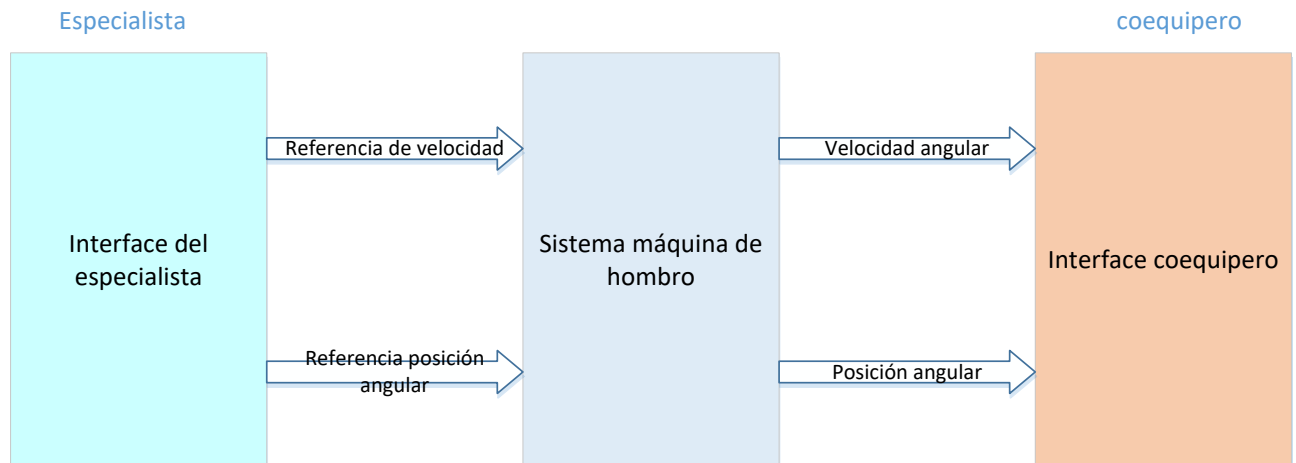


Figura 50. Referencia de entrada y salida en el sistema de rehabilitación

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

3.2.2 Referencia de posición angular:

Para la posición angular fue necesario calibrar el potenciómetro, el cual es el encargado de indicar la posición del eje a la salida de la máquina, los datos obtenidos en la calibración del potenciómetro se graficaron, los datos obtenidos en la gráfica son coherentes ya que el potenciómetro se había seleccionado lineal, al determinar la función de la línea recta esta se introduce al microcontrolador y se puede visualizar los datos de entrada como posición angular deseada en grados (°) y la salida real en grados (°) a pesar que el potenciómetro arroja valores en voltaje (V).

A continuación, se muestra la tabla en la cual se obtuvo variaciones de ángulos de 10 grados y su correspondiente valor en voltaje arrojado por el potenciómetro.

Tabla 22. Posición angular y voltaje del potenciómetro

voltaje	posición angular unidades
0,0035	0
0,061	10
0,131	20
0,209	30
0,286	40
0,37	50
0,439	60
0,519	70
0,586	80
0,671	90
0,727	100
0,807	110
0,883	120
0,968	130
1,032	140
1,086	150
1,155	160
1,204	170
1,268	180
1,323	190
1,373	200
1,429	210
1,491	220

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

1,563	230
1,624	240
1,681	250
1,732	260
1,793	270
1,861	280
1,924	290
1,973	300

Con los datos obtenidos en la anterior tabla se realizó la gráfica, que se muestra en la figura 51, que corresponde al comportamiento del potenciómetro frente a la posición angular del eje.

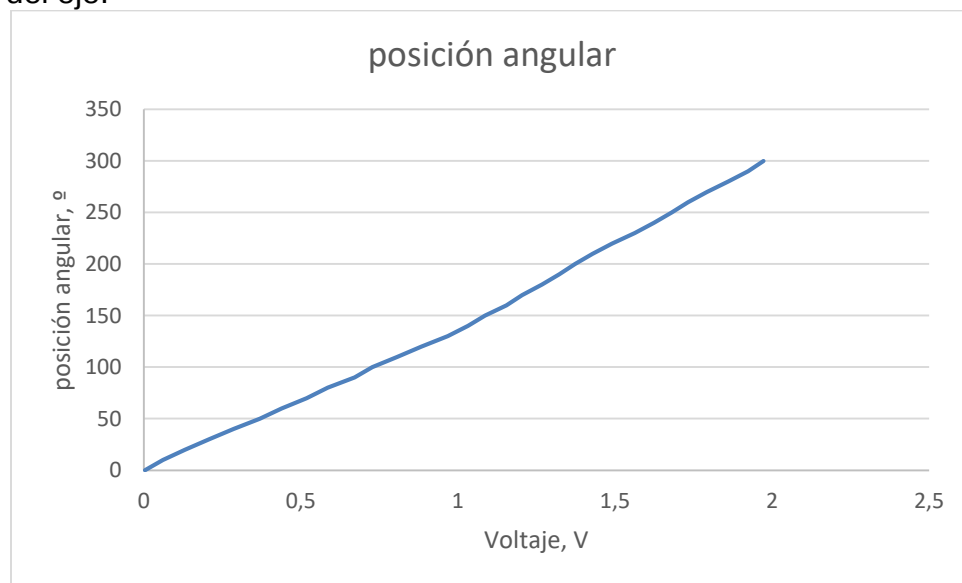


Figura 51. Voltaje (V) vs posición angular

La función lineal obtenida con la función es la siguiente:

$$\emptyset = 112,64V - 0,39$$

La función encontrada se utiliza para determinar por medio de la medición del voltaje la posición angular del actuador.

Una vez realizadas las pruebas de las tarjetas se pudo concluir que su diseño fue el adecuado ya que su correcto funcionamiento permitió obtener el control, la comunicación entre el lugar geográfico uno y el lugar geográfico dos y la información de las terapias realizadas.

3.3 Desarrollo de los servicios web y sus interfaces

3.3.1 SERVICIO DE AUTENTICACIÓN

3.3.1.1 DESCRIPCION

Este servicio permite el inicio de sesión mediante el ingreso del código de usuario y la clave de usuario, el servicio al ser invocado presenta un rol determinado de acuerdo al tipo de usuario autenticado, que puede ser especialista o auxiliar. Además brinda información útil para el control y registro de los usuarios, esta información es: el último día de acceso al sistema por parte del usuario autenticado, la dirección IP de la cual se conectó la última vez y el código de usuario autenticado.

La información de los usuarios se encuentra alojada en un base de datos remota de SQL server 2012, mediante la cual el servicio hace la verificación si los datos ingresados corresponden a los datos almacenados en dicha base. En la figura 52 se muestra el diagrama general del servicio de autenticación de usuarios.

Es importante resaltar que por cuestiones de seguridad la clave esta encriptada mediante un algoritmo hash.

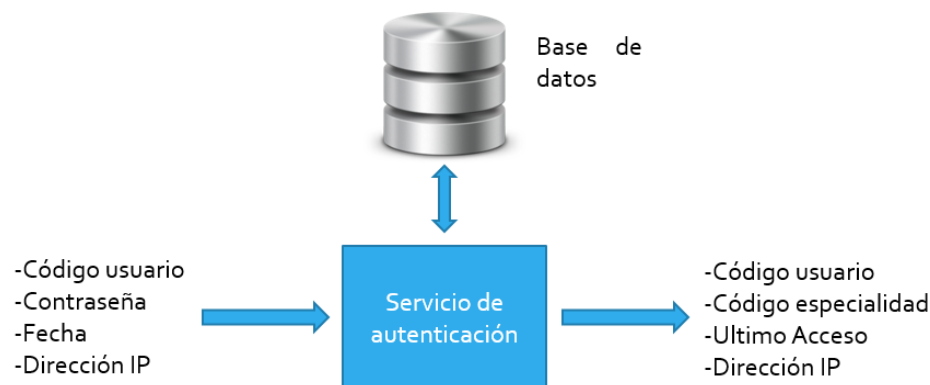


Figura 52. Diagrama general del servicio de autenticación.

En la figura 53, se presenta el servicio completo para la autenticación de usuarios el cual consta, del servicio de autenticación asociado a una interface gráfica que le da privilegios al usuario dependiendo su rol (especialista o auxiliar).

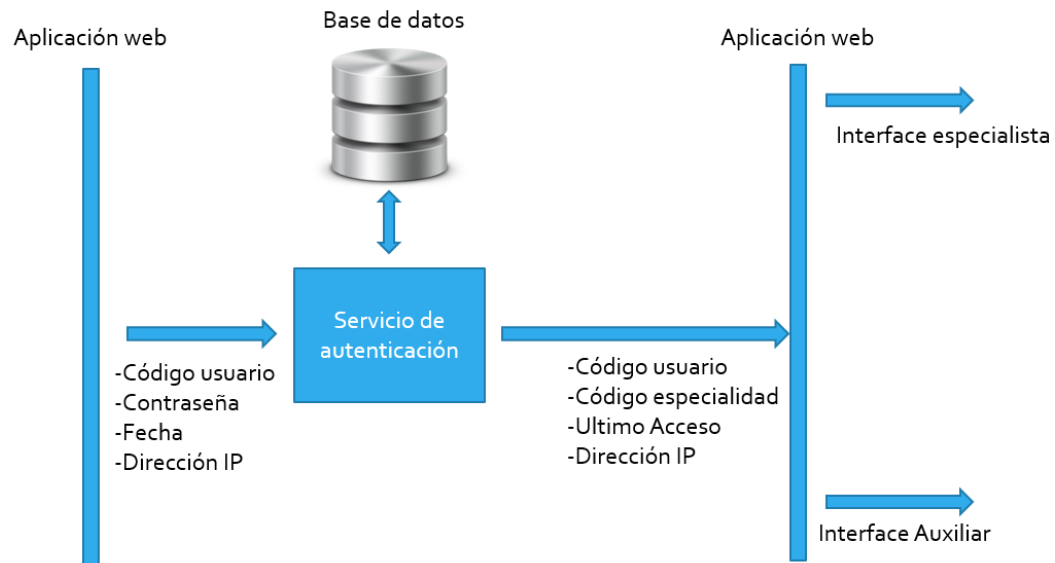


Figura 53. Sistema de autenticación de usuarios con su aplicación web.

A continuación, en la figura 54, se presenta la implementación de la aplicación web relacionada con el servicio de autenticación del especialista:



Figura 54. Aplicación autenticación.

Una vez en Login y la contraseña es validada por el servicio de autenticación se le asigna la interface de acuerdo al tipo de usuario autenticado, a continuación, en la figura 55 se presenta la interface de un especialista autenticado.

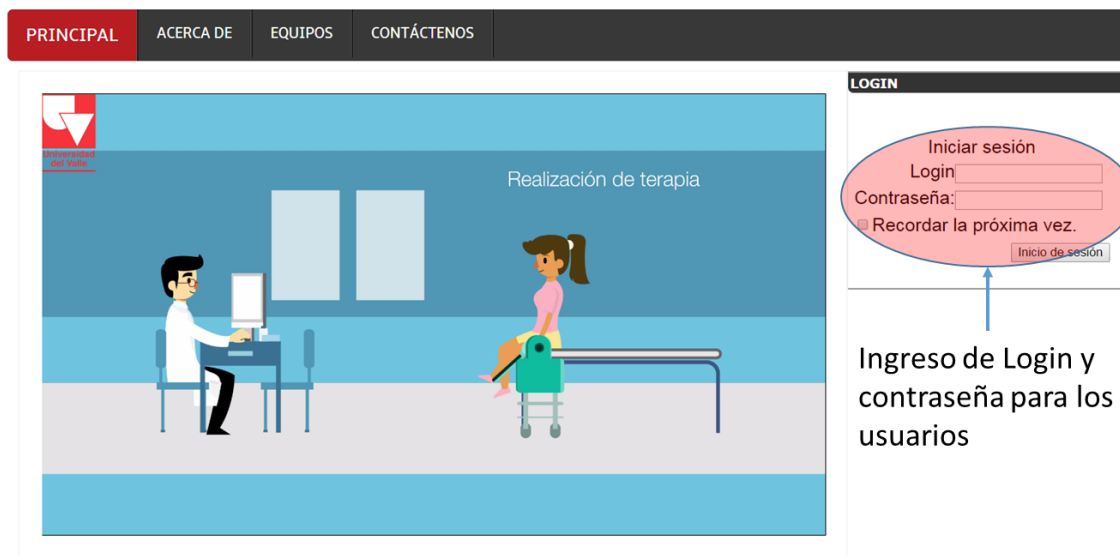


Figura 55. Interface de especialista autenticado.

A continuación, en la figura 56, se presenta la implementación de la aplicación web relacionada con el servicio de autenticación del auxiliar:

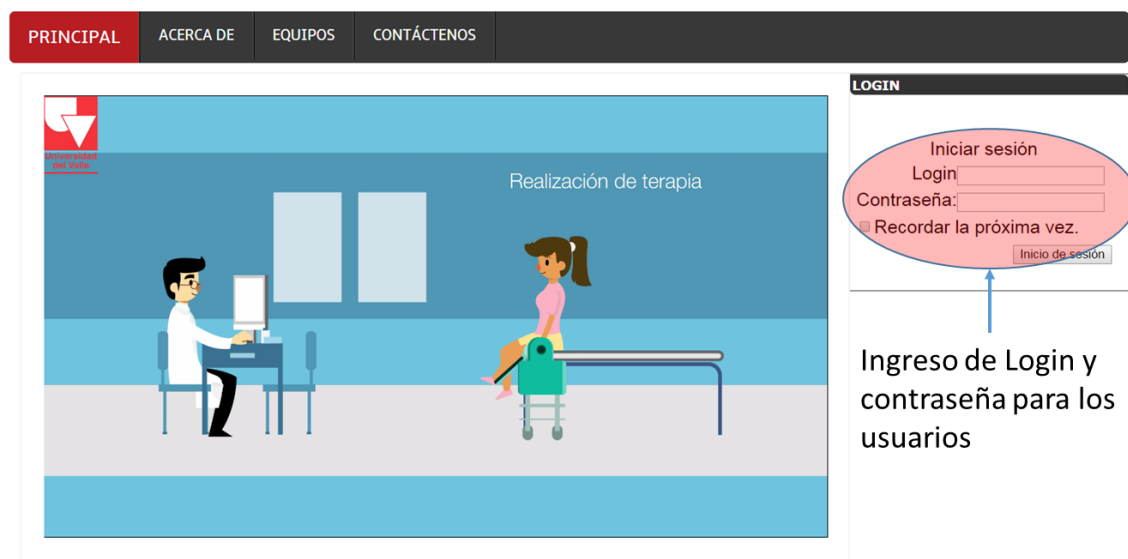


Figura 56. Aplicación autenticación.

Una vez en Login y la contraseña es validada por el servicio de autenticación se le asigna la interface de acuerdo al tipo de usuario autenticado, a continuación, en la figura 57 se presenta la interface de un auxiliar autenticado.



Universidad del Valle

Usuario: dossa | IP: 192.168.0.11 | Ultimo acceso: 19/08/2016 07:23:40 pm | **Cerrar Sesión**

AUXILIAR ONLINE

Identificación Paciente

Apellidos
Nombres
Edad
Fecha de nacimiento
Sexo
Ocupación
Estado civil
Domicilio
Teléfono

Inspección visual maquina Reprobado ▾

Inspección del paciente No apto ▾

Inspección interna de maquina **Iniciar**

Identificación del paciente

Buscar Paciente

Figura 57. Interface de auxiliar autenticado.

3.3.1.2 MENSAJES DE ALERTA DEL SISTEMA

El sistema de autenticación de usuarios cuenta con cuadros de dialogo que informan al usuario si se ha presentado una falla en el servicio, dichas fallas como la conexión remota con la base de datos, el usuario y/o contraseña no son válidos y la conexión con el servidor, a continuación, se presenta el código utilizado para las alertas del servicio.

En la figura 58, se presenta uno de los mensajes de alerta que puede visualizar el usuario en la interface.



Figura 58. Mensaje de alerta del sistema de autenticación de usuarios

3.3.2 SERVICIO DE BÚSQUEDA DE PACIENTE

3.3.2.1 DESCRIPCION

Una vez el auxiliar este autenticado puede invocar el servicio de búsqueda de un paciente, para invocar el servicio de búsqueda de paciente se requiere introducir el número de identificación del paciente a consultar. El servicio tiene la función de realizar la búsqueda del paciente ingresado en la base de datos remota, una vez el servicio encuentra al paciente la información retornada corresponde a los datos personales y al historial clínico asociado con rehabilitación física. En la figura 59 se muestra el diagrama general del servicio de búsqueda de pacientes.

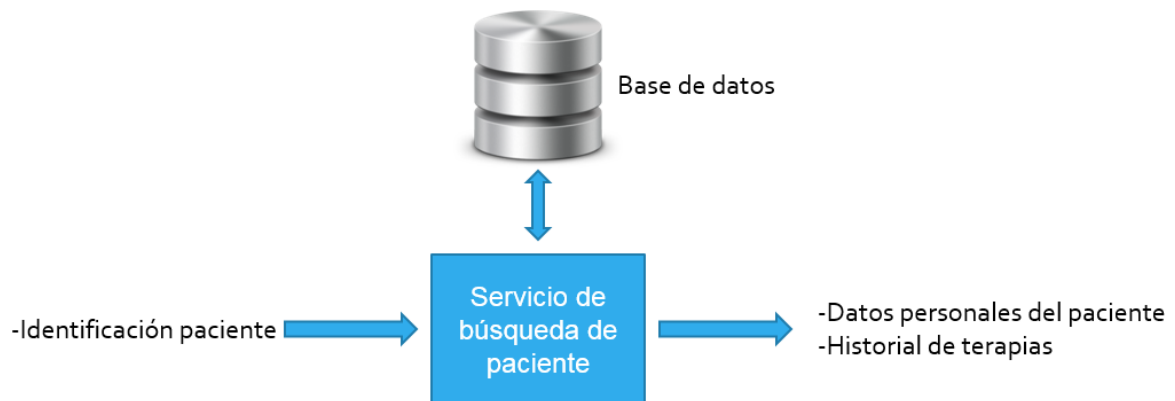


Figura 59. Diagrama general del servicio de búsqueda de paciente.

En la figura 60, se presenta el servicio completo para la búsqueda de pacientes el cual consta, del servicio de búsqueda de paciente asociado a una interface gráfica.

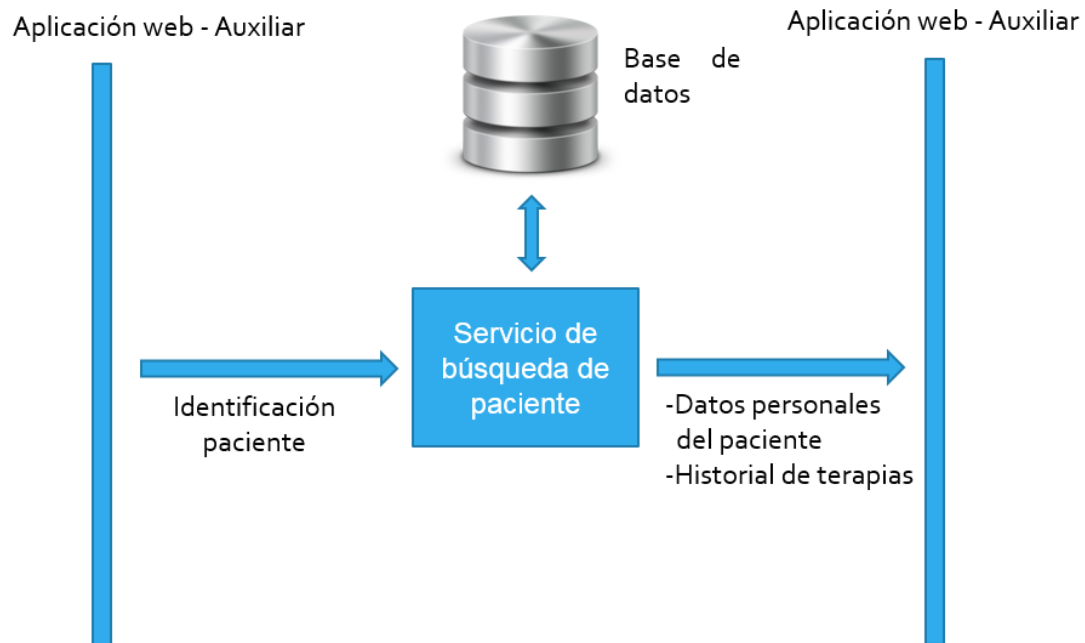


Figura 60. Sistema de búsqueda de paciente.

Interface web del auxiliar.

El servicio después de ser invocado por medio de la aplicación web del auxiliar, retorna la información personal del paciente y su historia clínica asociada a rehabilitación física, las cuales son visualizadas por el auxiliar en dicha aplicación. A continuación, se presenta la secuencia de operación de la aplicación web del auxiliar.



Figura 61. Ingreso de identificación del paciente en la aplicación web del auxiliar.

Una vez ingresado el número de identificación del paciente, se invoca el servicio y este retorna la información asociada a la identificación ingresada, en la figura 62 se presenta la información visualizada por el auxiliar la cual fue gestionada por el servicio de búsqueda de pacientes.

COD.	ESPEC.	COD.	COEQUIP.	FECHA	REPETICION	ALCANZADAS	SERIES	ALCANZADAS
0389	0455			2015-09-1010			3	
0389	0455			2015-09-1210			3	
8015	0455			2016-07-26				
8015	0455			2016-58-26				
8015	0455			2016-07-295			7	
8015	0455			2016-59-08				
8015	0455			2016-00-08				
8015	0455			2016-21-08				
8015	0455			2016-27-08				

Figura 62. Información en la aplicación web del auxiliar entregar por el servicio de búsqueda de paciente

En la figura 63, se presenta uno de los mensajes de alerta que puede visualizar el auxiliar en la interface.



Figura 63. Mensaje de alerta del sistema de búsqueda de pacientes.

3.3.3SERVICIO DE ACTUALIZACION DE HISTORIA CLINICA.

3.3.3.1 DESCRIPCION.

Este servicio se la ha asignado la función de realizar la actualización de historia clínica durante y al finalizar la terapia de rehabilitación física tele operada, esta actualización se realiza mediante la inserción de información generada por el especialista, al momento de definir el protocolo de rehabilitación y por la máquina de acuerdo a los movimientos de rehabilitación ejecutados por la máquina, en la figura 64 se presenta el diagrama general de este servicio.

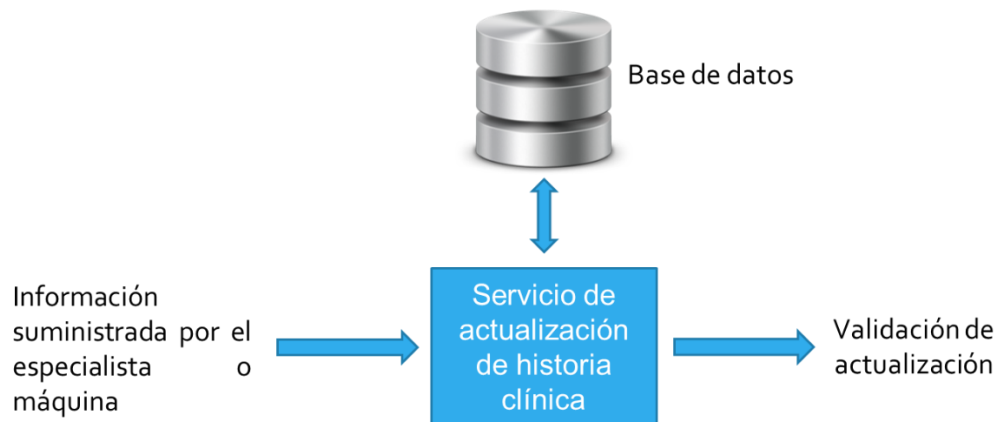


Figura 64. Diagrama general del servicio de actualización de historia clínica.

Para evaluar el funcionamiento de tele-operación de la máquina de rehabilitación de hombro, se realizaron listados de los eventos que se presentan durante la prestación de un servicio, estos eventos se presentan en las tablas 23,24,25,26,27 y 28, cada tabla tiene unos colores, los cuales relacionan los eventos con cada uno de los cuatro servicios web definidos en la arquitectura con orientación a servicios. El naranja corresponde al servicio de autenticación, el azul al de búsqueda de paciente, agua marina actualización de historia clínica y violeta al de comunicaciones.

En la figura 65, se presenta el sistema de comunicaciones el cual está conformado por el servicio de comunicaciones, las interfaces de usuario y la máquina de rehabilitación física.

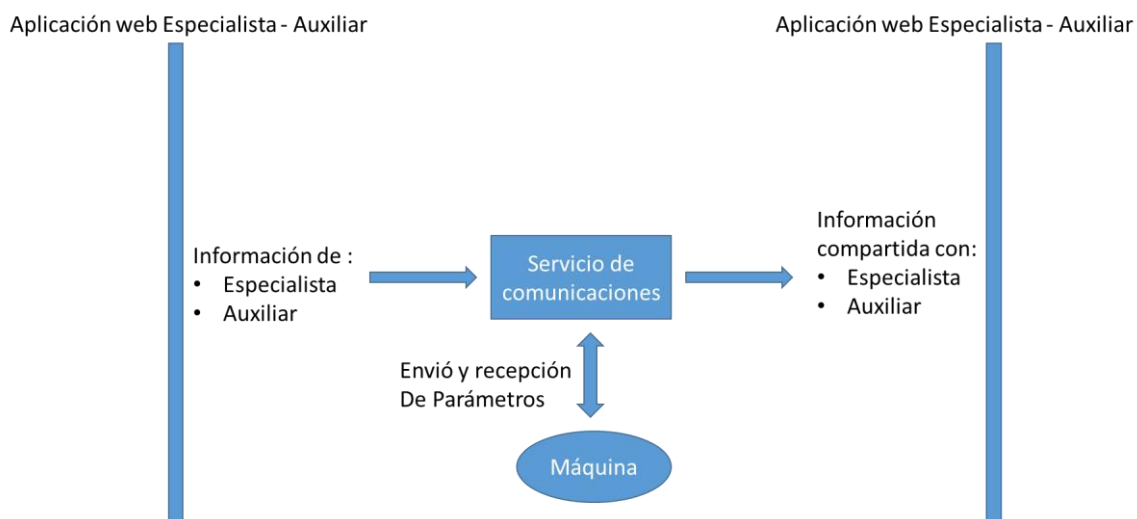


Figura 65. Diagrama del sistema de comunicaciones.

Concepción del servicio de comunicaciones. Para la concepción del servicio de comunicaciones se emplearon herramientas para plantear el diseño de software como los diagramas de actividad y casos de uso, a continuación, se presenta el diagrama de actividad del servicio de comunicaciones.

3.4 pruebas del sistema de rehabilitación de hombro tele-operado via internet utilizando una arquitectura con orientación a servicios.

3.4.1 Escenario 1. Funcionamiento normal de un servicio de rehabilitación de hombro tele-operado

Aquí se va a presentar las pruebas funcionales para una rehabilitación de hombro, en este caso el sistema se comporta de manera óptima sin ningún tipo de eventualidad durante la prestación del servicio de rehabilitación.

Se inicia el proceso con la autenticación de los usuarios, se registra el especialista, en la interfaz de la aplicación le da la opción de ingresar un login y Password, como se muestra en la figura 66, de acuerdo a los datos suministrados por la persona el servicio web denominado *Autenticación de usuarios* busca en la base de datos del hospital si la persona que se autentico es especialista o auxiliar.

Necesita ayuda? llámanos al 317-589-8725 ó 316-676-7721

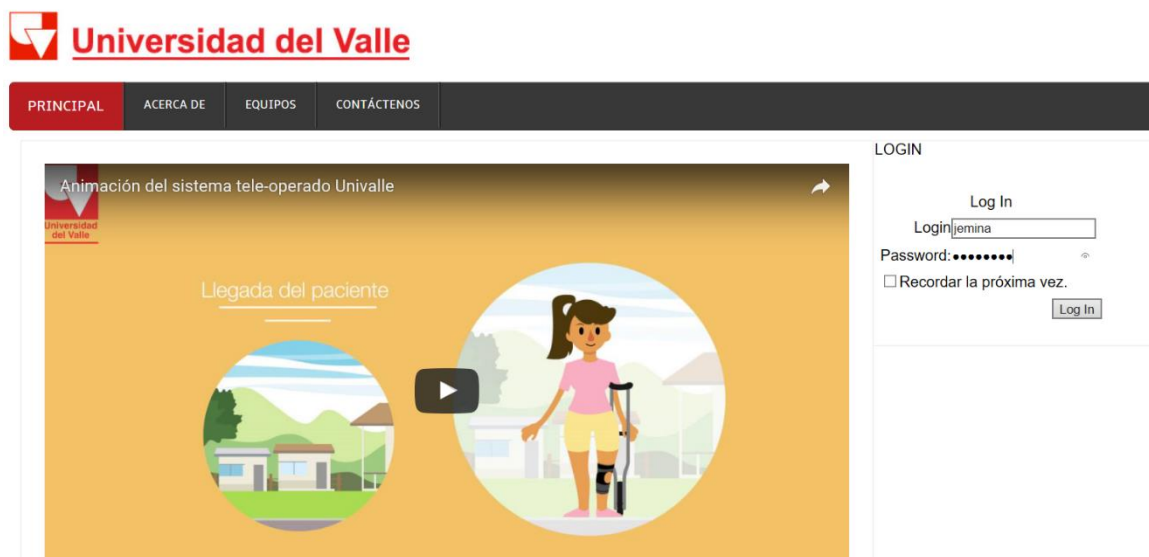


Figura 66. Registro del especialista

Al momento que el especialista se autentica este evento es registrado por la base de datos como se muestra en figura 67. La base de datos brinda información de la persona

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

autenticada como es su especialidad, ultimo acceso y la IP de donde accede, esto permite tener un control de los especialistas y auxiliares que realizan labores de telemedicina en los respectivos hospitales.

54	1259	(AUX_E) MORALES IDROBO PILAR ANDREA (SIL)	NULL	pmorales	NULL	5	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
55	1501	(FST) SAENZ ADRIANA	NULL	asaenz	NULL	5	290	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
56	1508	(FST) YUBI MAPALLO	NULL	ymapayo	NULL	5	290	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
57	1603	(FST) CORREA RAMIREZ JENNY CAROLINA (1MAY)	NULL	jcorrea	01	5	290	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
58	1604	(FST) CANDAMIL ELEONORA (SIL)	NULL	ecandamil	01	5	290	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
59	1611	(FST) JENNY MINA GRIJALBA (TER)	29-76287	jemina	NULL	5	290	6/2/2017 7:50 pm	190.29.147...	...
60	2006	(AUX_E) RIVERA LUZ ELENA (SFAM)	NULL	lerivera	NULL	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
61	2053	(JF) GUTIERREZ QUIROZ DEISY VIVIANA (SIL)	76-5571	dgutierrez	NULL	3	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
62	2120	(FISIO) MARIA ANGELICA CONDE POLANIA (MEL)	NULL	mconde	NULL	5	290	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
63	2124	(AUX_E) VIVIANA ANDREA MUÑOZ FIGUEROA (MEL)	NULL	vmunoz	01	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL

Figura 67. Registro en la base de datos del especialista autenticado

Una vez el especialista se autentico la aplicación le genera una nueva pantalla en la cual aparece el usuario, la IP de conexión y la fecha y hora de la última vez que se conectó como especialista, esto se muestra en la figura 68, además queda en espera que le lleguen datos del paciente que va a atender en esta ocasión.


Universidad del Valle

Usuario
jemina

IP
190.29.147.190

Ultimo acceso
6/2/2017 7:50 pm

Cerrar Sesión

ESPECIALISTA ONLINE

Identificación
 Apellidos
 Nombres
 Edad
 Fecha de nacimiento
 Sexo
 Ocupación
 Estado civil
 Domicilio
 Teléfono

Figura 68. Interfaz de especialista en espera de paciente

Una vez el auxiliar se autentica, sucede lo mismo que con el especialista, hay una inserción en la base de datos con la información del auxiliar autenticado, esto se puede observar en la figura 69. La información de la inserción en la base de datos corresponde a la información que se encuentra en la interface del auxiliar.

CODIGO	NOMBRE	REGIST...	CODIGO_USUAR...	SUCURSAL	TIPO	COD_ESPECIALIDAD	CLAVE	ULTIMO_ACCESO	IP
35	0874 (AUX_E) SHIRLEY REYES CHILA (SUL) (SIL)	NULL	shreyes	NULL	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
36	0910 (AUX_E) AMANDA DEL PILAR MANYOMA VENTE (V H)	NULL	apmanyoma	NULL	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
37	0911 (DESAC) FABIAN PAGUAY IPIA (AUX_E) SILOE	NULL	fapaguay	NULL	4	782	10-06-2016 10:53:12 ...	NULL	NULL
38	0912 (AUX_E) NIDIA OSPINA TAPIERO (SILOE)	NULL	niospina	NULL	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
39	0916 (ENF) LUCERO ALVAREZ (MON)	NULL	lalvarez	NULL	3	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
40	0921 (AUX_E) DIANA CAROLINA OSSA (MEL)	NULL	dossa	NULL	4	782	24/1/2017 9:53 am	138.122.20...	...
41	0942 (AUX_E) JENNIFER URIBE LOZANO	NULL	juribe	NULL	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
42	0946 (AUX_E) KAREN TATIANA QUIÑONEZ (VOR)	NULL	kquinonez	NULL	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
43	0952 (AUX_E) LEIDY JOHANA GAÑAN COLORADO (BUI)	NULL	lgañan	NULL	5	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL
44	0963 (AUX_E) AMANDA AVIRAMA GUERRITE (SIL)	NULL	avirama	NULL	4	782	09/06/2016 6:17:42 PM	NULL	NULL

Figura 69. Registro en la base de datos del auxiliar autenticado

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

El auxiliar realiza el mismo procedimiento que el especialista en cuanto al registro, una vez registrado en la interface de auxiliar aparecen los siguientes datos: usuario, IP, fecha y hora del ultimo acceso al sistema y casilla para ingresar el documento de identidad de paciente a atender, esta información se puede ver en la figura 70.

Necesita ayuda? llámanos al 317-589-8725 ó 316-676-7721

Mensajes 0



Figura 70. Interface del auxiliar una vez se autentica.

El proceso de autenticación de los usuarios (especialista y auxiliar) se realiza como se definió en el diseño de la arquitectura, cumpliendo con los requerimientos definidos por el sistema, además el servicio de autenticación respeta las entradas y salidas que fueron determinadas en el diagrama de proceso que se muestra en la figura 71.

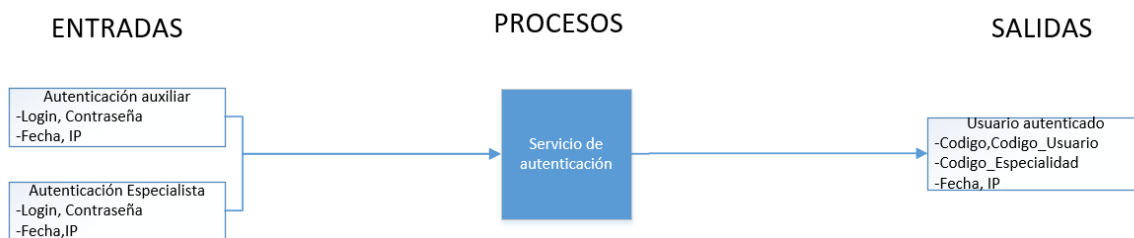


Figura 71. Diagrama de procesos del servicio de autenticación.

A continuación, se realiza la búsqueda de paciente, una vez el auxiliar ingresa el documento de identidad del paciente, el servicio web denominado: *Búsqueda de pacientes* realiza la búsqueda y actualiza los datos del paciente en la interface del auxiliar, los datos actualizados son de información general del paciente y de la historia clínica relacionada con rehabilitación, esto se muestra en la figura 72 y 73.



Universidad del Valle

Usuario: dossa IP: 190.29.147.190 Último acceso: 6/2/2017 7:50 pm [Cerrar Sesión](#)

AUXILIAR ONLINE

Identificación: 00010603331 Inspección visual máquina: Identificación del paciente: 00010603331 | x

Apellidos: HOYOS OJEDA Inspección del paciente:

Nombres: KATHERINE JUANA

Edad: 17 años

Fecha de nacimiento: 06-01-2000 Inspección interna de máquina:

Sexo: Femenino

Ocupación: PERSONAS QUE NO HAN DECLARADO OCUPACION

Estado civil: a

Domicilio: CALL23 N -5-26

Teléfono: 8828972

Figura 72. Información general del paciente a ser atendido

En la figura 73 se muestra la información de la historia clínica relacionada con terapias de rehabilitación, aquí se puede ver que la lesión del paciente es de hombro lado izquierdo, esto está definido por la orden de terapia que se encuentra en la historia clínica del paciente.

Orden de Terapia

Orden	Fecha	Lesión	Lado Afectado	Sesiones	Estado	Diagnóstico
4	2015-10-03	HOMBRO	IZQUIERDO	1	ACTIVO	

Historial de Terapias

Fecha	Orden	Sesión	Cod. Especialista	Cod. Auxiliar	Lado afectado	Tipo de Lesión	Tipo de Terapia	Tipo de Movimiento	Amplitud M1 Deseada	Amplitud M1 Alcanzadas	Amplitud M2 Deseada	Amplitud M2 Alcanzadas	% Am Movim
2017-1-24 11:12 am	4	2	1611	0921	IZQUIERDO	HOMBRO	PASIVA	FLEXION-EXTENSION	100		10		

Figura 73. Información de historia clínica y orden de terapia.

La búsqueda del paciente se registra en la base de datos, la cual se puede ver su inserción en la figura 74, en esta base de datos se tiene la información general y

relacionada con la rehabilitación, además se tiene información administrativa que se maneja desde la orden medica que le asigna tipo de lesión y lado lesionado.

ID_TERAPIA	IDENTIFICACION_PACIENTE	CODIGO_ESPECIALISTA	CODIGO_COEQUIPE	NUMERO_ORD	NUMERO_SESI	FECHA	COD_TIPO_LESI	COD_LADO_AFECTA	COD_TIPO_TERA	FLEXION_DESEA	FLEXION_ALCAN
13	499	0084311	1611	0921	1	11	2017-1-24 10:05 am	1	1	60	60
14	500	00010603331	1611	0921	4	1	2017-1-24 10:38 am	2	1	NULL	NULL
15	501	0084311	1611	0921	1	11	2017-1-24 10:49 am	1	1	60	60
16	502	00010603331	1611	0921	4	2	2017-1-24 11:12 am	2	1	100	NULL
17	503	0084311	1611	0921	1	11	2017-1-24 11:26 am	1	1	60	NULL
18	504	0084311	1611	0921	1	11	2017-1-24 1:06 pm	1	1	60	0
19	505	0084311	1611	0921	1	11	2017-1-24 1:28 pm	1	1	60	60
20	509	00010603331	NULL	0921	4	3	2017-2-6 8:28 pm	2	2	NULL	NULL

Figura 74. Búsqueda de paciente en la base de datos.

Debido a que el auxiliar ya registro al paciente al momento de ingresar su número de documento de identidad, la información obtenida por el servicio *búsqueda de paciente*, es enviada a la interface del especialista quien puede ver la información general del paciente, orden de terapia y su historia de las terapias que ha tenido, como se ve en la figura 75, esto con el fin que el especialista pueda tener conocimiento del paciente que va a atender



ESPECIALISTA ONLINE

Identificación 00010603331
Apellidos HOYOS OJEDA
Nombres KATHERINE JUANA
Edad 17 años
Fecha de nacimiento 06-01-2000
Sexo Femenino
Ocupación PERSONAS QUE NO HAN
DECLARADO OCUPACION
Estado civil a
Domicilio CALL23 N -5-26
Teléfono 8828972

Orden de Terapia

Orden	Fecha	Lesión	Lado Afectado	Sesiones	Estado	Diagnóstico
4	2015-10-03	HOMBRO	IZQUIERDO	1	ACTIVO	

Historial de Terapias

Fecha	Orden	Sesión	Cod. Especialista	Cod. Auxiliar	Lado afectado	Tipo de Lesión	Tipo de Terapia	Tipo de Movimiento	Amplitud M1 Deseada	Amplitud M1 Alcanzadas	Amplitud M2 Deseada	Amplitud M2 Alcanzada	% Am Movim
2017-1-24 11:12 am	4	2	1611	0921	IZQUIERDO	HOMBRO	PASIVA	FLEXION-EXTENSION	100		10		

Figura 75. Información del paciente que le llega al especialista

Esta búsqueda de paciente también cumple con lo definido por la arquitectura y los requerimientos de diseño del servicio web, en la figura 76 se presenta el diagrama de proceso del servicio.

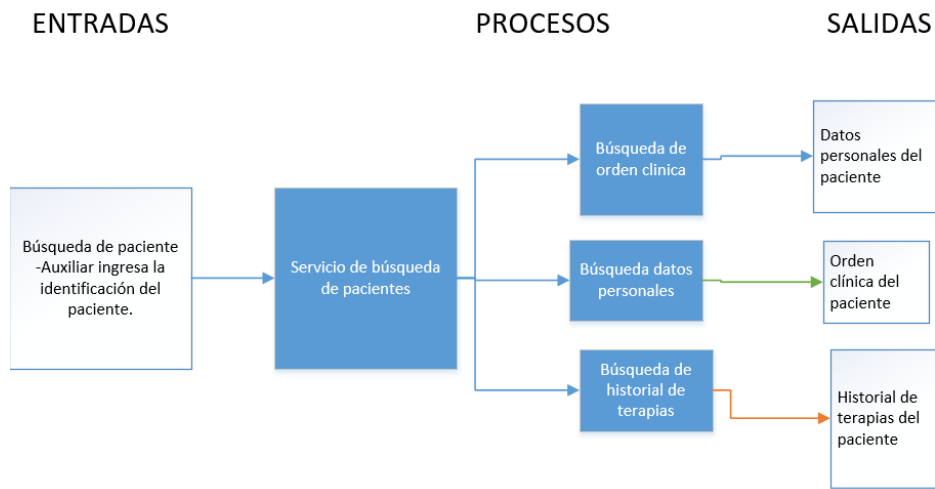
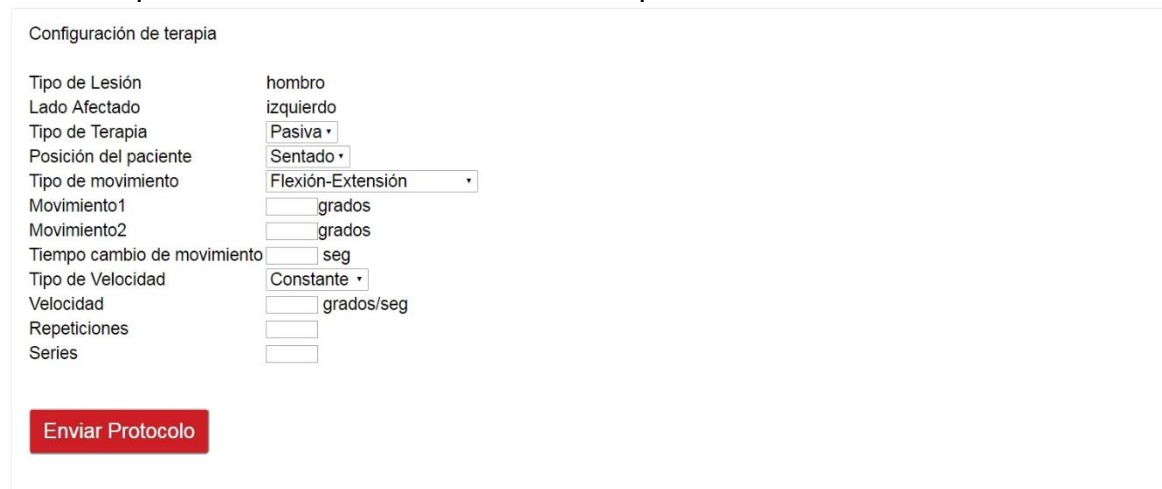


Figura 76. Diagrama de procesos del servicio de búsqueda de paciente

A continuación, se presenta los eventos que están relacionados con el servicio web de comunicación, este servicio principalmente está vinculado con la información que llega y sale de la máquina. Como se puede observar en la figura 77 en la interface del especialista, él tiene la posibilidad de ingresar los campos relacionados con el protocolo de rehabilitación. A diferencia de la rehabilitación de rodilla, el especialista puede escoger entre los seis movimientos anatómicos que puede ejecutar el hombro. Cabe anotar, que se tiene algunos campos los cuales no pueden ser modificados debido a que estos están definidos por la orden de terapia que está ingresada de manera previa a la base de datos, esto con el fin de disminuir el posible riesgo de equivocación por parte del especialista debido a que no tiene contacto directo con el paciente.



Configuración de terapia

Tipo de Lesión	hombro
Lado Afectado	izquierdo
Tipo de Terapia	Pasiva ▾
Posición del paciente	Sentado ▾
Tipo de movimiento	Flexión-Extensión ▾
Movimiento1	grados
Movimiento2	grados
Tiempo cambio de movimiento	seg
Tipo de Velocidad	Constante ▾
Velocidad	grados/seg
Repeticiones	
Series	

Enviar Protocolo

Figura 77. Protocolo por definir por el especialista

En la figura 78 se presentan los campos definidos por el especialista, esto quiere decir que ya configuro un protocolo para ser aplicado al paciente.

Configuración de terapia

Tipo de Lesión	hombro
Lado Afectado	izquierdo
Tipo de Terapia	Pasiva ▾
Posición del paciente	Sentado ▾
Tipo de movimiento	Aducción-Abducción ▾
Movimiento1	80 grados
Movimiento2	20 grados
Tiempo cambio de movimiento	5 seg
Tipo de Velocidad	Constante ▾
Velocidad	25 grados/seg
Repeticiones	3
Series	3

Enviar Protocolo

Figura 78. Protocolo definido por el especialista

El protocolo definido por el especialista se inserta en la base de datos que va ligada con la historia clínica del paciente, en la figura 79 se puede ver que la inserción en la base de datos es de información de movimientos deseados, debido a que hasta el momento no se ha dado inicio a la terapia.

ISI	ADUCCION_DESEADA	ADUCCION_ALCANZA	ABDUCCION_DESEADA	ABDUCCION_ALCANZA	PORCENTAJE_ADU_A	ROTACION_INTERNA_DESEA	ROTACION_INTERNA_ALCANZA	ROTACION_EXTERNA_DESEA	ROTACION_EXTERNA_ALCANZA
13	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	NULL	NULL
14	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	90	NULL
15	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	NULL	NULL
16	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
17	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
18	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	NULL	NULL
19	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
20	80	NULL	20	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Figura 79. Inserción de información en la base de datos de ángulos deseados para la terapia

Una vez este protocolo es definido por el especialista es enviado al auxiliar, este protocolo le llega a la interface del auxiliar, el auxiliar recibe un mensaje de información sobre la llegada del protocolo, este mensaje se muestra en la figura 80, en la figura 81 se presenta el protocolo que le llega al auxiliar, este protocolo solo es de lectura este no puede ser modificado por el auxiliar, además en este protocolo se presenta la opción de aceptación o negación del protocolo por parte del paciente.



Figura 80. Mensaje de llegada del protocolo al auxiliar

Protocolo ha realizar

Tipo de Lesión	hombro
Lado Afectado	izquierdo
Tipo de Terapia	Pasiva
Posición del paciente	Sentado
Tipo de movimiento	Aducción-Abducción
Movimiento1	80
Movimiento2	20
Resistencia	3
Tiempo cambio de movimiento	5
Repeticiones	3
Series	3
Tipo de Velocidad	Constante
Velocidad	25

¿El paciente acepta el protocolo socializado. ?

☐ Si

☐ No

Figura 81. Interface del auxiliar con el protocolo definido por el especialista.

Una vez socializado el protocolo y aceptado por el paciente esta información es gestionada por el auxiliar como se muestra en la figura 82 y es enviada al especialista con la opción de colocar algún tipo de observación.

¿El paciente acepta el protocolo socializado. ?

☒ Si

☐ No

Observaciones:

El paciente acepta el protocolo programado para la terapia de hombro

Enviar información

☐ Autorizado para iniciar procedimiento

Figura 82. Confirmación de aceptación de protocolo por parte del paciente

A la interface del especialista le llega la confirmación de aceptación del protocolo por parte del paciente y la observación que fue ingresada por el auxiliar como se puede ver en la figura 83

Estado del procedimiento

☐ En espera

☒ Listo Para Iniciar Terapia

El paciente acepta el protocolo

Observación del auxiliar:
El paciente acepta el protocolo programado para la terapia de hombro

Iniciar Terapia Cancelar Terapia

Figura 83. Confirmación del protocolo por parte del paciente

Una vez le llega al especialista la confirmación del paciente enviada por el auxiliar, el especialista tiene la opción de iniciar la terapia o cancelar la terapia, para el caso de prueba el especialista inicia la terapia, sin esta autorización por parte del especialista el auxiliar no podría darle inicio a la máquina, esta condición confirma la sincronía de los eventos entre el auxiliar y el especialista, en la figura 84 se presenta la llegada de la autorización de inicio de procedimiento, una vez se autoriza se activa la ventana de transferir datos a la máquina, lo cual es ejecutado por el auxiliar, estos datos son los relacionados con el protocolo definido por el especialista y que ya han sido socializados con el paciente.

El paciente acepta el protocolo programado

Enviar información

☒ Autorizado para iniciar procedimiento

Transferir Datos a la Máquina Datos enviados a la maquina exitosamente

Figura 84. Autorización de inicio de terapia y transferencia de datos a la máquina.

Una vez los datos se envían a la máquina llega un mensaje al auxiliar donde le indica que la terapia ya va a iniciar, esto con el fin de que el auxiliar tenga precaución en que todo esté listo y si algo falta pueda suspender la terapia en el momento que el considere, en la figura 85 se muestra el mensaje.

Mensajes **1**

Iniciar terapia

Figura 85. Mensaje de inicio de terapia en máquina.

El servicio de comunicación está presente durante toda la ejecución de la terapia, lo que permite decir que cumple con las condiciones iniciales de diseño, en la figura 86 se presenta el diagrama de procesos de este servicio.

ENTRADAS

PROCESOS

SALIDAS

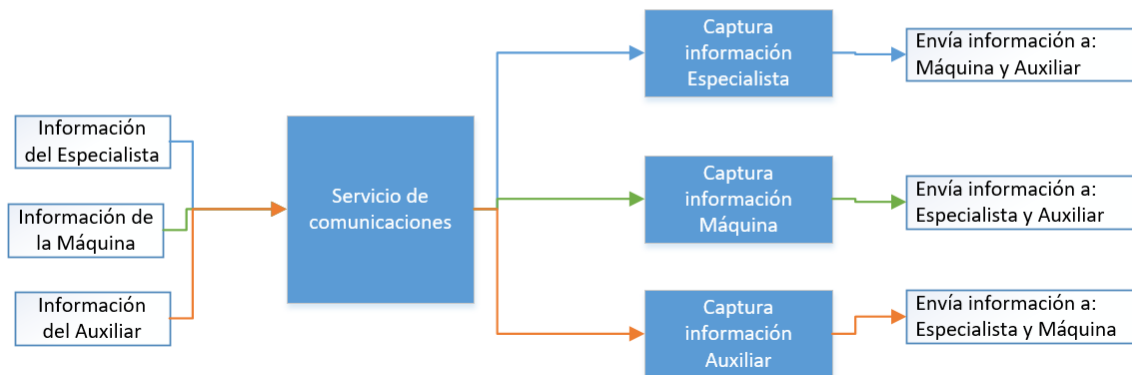


Figura 86. Diagrama de procesos del servicio de comunicaciones.

Los datos alcanzados por la máquina durante el desarrollo de la terapia se van registrando tanto en la interface del especialista como en la del auxiliar, esto con el fin de ver cómo se desarrolla la terapia y si los datos definidos en el protocolo son correctos en comparación con los datos que tiene la máquina para ejecutar, en la figura 87 se muestra el estado de terapia tanto para auxiliar como para especialista.

Estado terapia

Descripción	Alcanzada	Porcentaje
# Serie	3	100
Resistencia		0
Repeticion	3	100
Velocidad progresiva		0
Velocidad constante	25	0
Rotacion externa		0
Rotacion interna		0
Abduccion	20	100
Aduccion	80	100
Extension		0
Flexion		0
Angulo	30	0

Figura 87. Estado de terapia en interface de especialista y auxiliar.

Una vez se ejecuta toda la terapia de acuerdo a lo definido por el especialista en el protocolo, la máquina esta enviando información permanente para actualizar la base de datos en el servidor y de esta manera tener la trazabilidad del tratamiento de cada paciente en terapias de rehabilitación, la máquina envía el mensaje de finalización de la terapia, como se puede ver en la figura 88.



Figura 88. Finalización de terapia, mensaje en la interfaz del auxiliar

Una vez se finaliza la terapia se actualiza la base de datos y se comparan los datos deseados con los ángulos alcanzados por el paciente durante la terapia, en la figura 89 se puede ver la inserción de estos datos con su porcentaje de éxito en el desarrollo de la terapia.

ISI	ADUCCION_DESEADA	ADUCCION_ALCANZA	ABDUCCION_DESEADA	ABDUCCION_ALCANZA	PORCENTAJE_ADU_A	ROTACION_INTERNA_DESEA	ROTACION_INTERNA_ALCANZA	ROTACION_EXTERNA_DESEA	ROTACION_EXTERNA
13	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	NULL	NULL
14	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	80	NULL
15	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	NULL	NULL
16	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
17	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
18	NULL	NULL	NULL	NULL	0	NULL	NULL	NULL	NULL
19	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
20	80	80	20	20	100	NULL	NULL	NULL	NULL

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

Figura 89. Datos actualizados en la base de datos de la terapia ejecutada.

En la figura 90 se puede ver todas las notificaciones que se le hace de manera síncrona al especialista durante la ejecución de una terapia de rehabilitación, como se puede observar el último mensaje es el que le indica que la terapia ya ha sido finalizada.

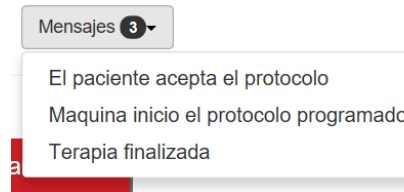


Figura 90. Notificaciones que llegan a la interface del especialista.

Por último, se tiene el diagrama de procesos del servicio de actualización de historia clínica, que es el encargado de insertar en la base de datos del paciente la información relacionada con la terapia realizada, en la figura 91 se presenta este servicio.

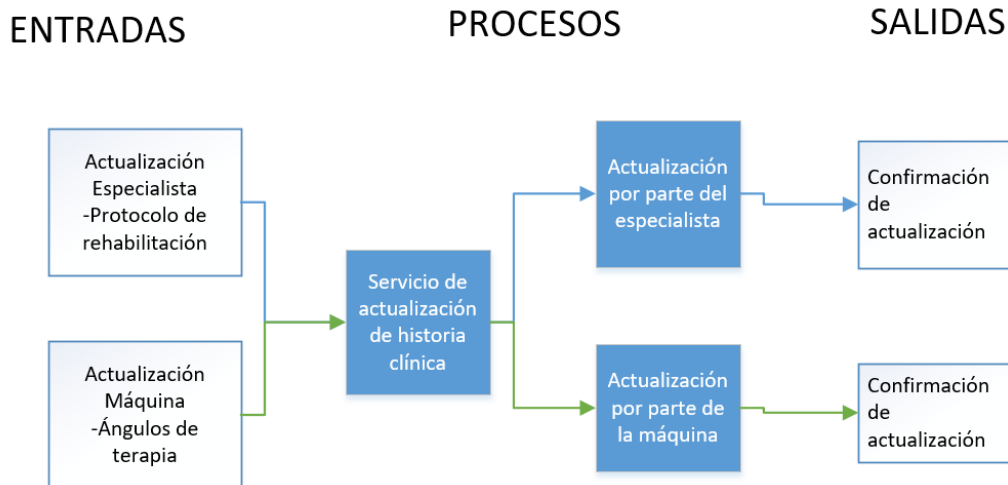


Figura 91. Diagrama de procesos del Servicio de actualización de historia clínica

En la tabla 23 se presenta la secuencia de eventos para una rehabilitación de hombro tele-operada via internet.

	1. Autentica	2. Búsqueda a paciente	3. Llegada Historia Clínica	4. Define protocolo	5. Llego protocolo	6. Socializa protocolo	7. Acepta protocolo
Especialista	SI	N.A	SI	SI	N.A	N.A	N.A
Auxiliar	SI	SI	SI	N.A	SI	SI	N.A
Paciente	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	SI

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

Máquina	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	
	8. Inspección visual	9. Función máquina	10. Autoriza inicio terapia	11. Envía información a máquina	12. Ejecuta terapia	13. Eventualidad durante terapia	14. Actualiza historia clínica	15. fin de terapia
Especialista	N.A	N.A	SI	N.A	N.A	N.A	NA	N.A
Auxiliar	NA	N.A	N.A	SI	N.A	N.A	NA	N.A
Paciente	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	NA	N.A
Máquina	N.A	SI	N.A	N.A	SI	N.A	SI	SI

3.5 Construcción de máquina de rehabilitación de hombro tele-operada vía internet.

A continuación, en la figura 92 se presenta la máquina de rehabilitación de hombro que puede ser tele-operada por internet, en esta figura se indica las entradas de movimiento que permiten alcanzar los tres grados de libertad y rehabilitar los seis movimientos anatómicos del hombro.

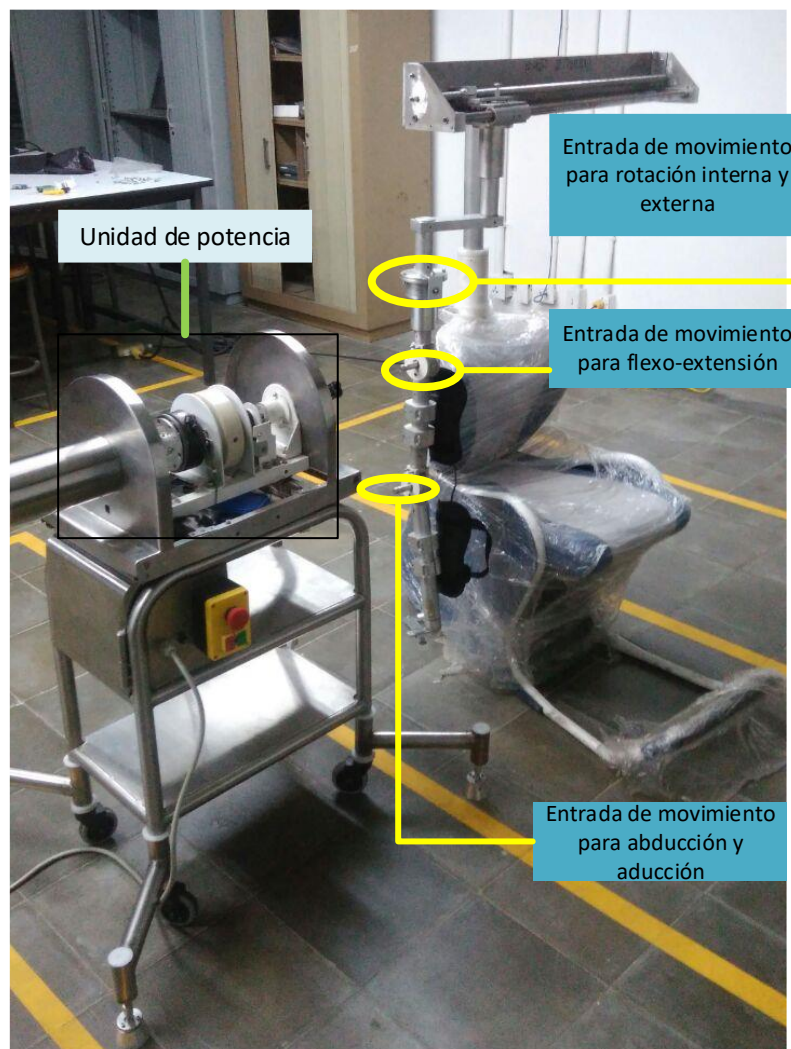


Figura 92. Entradas de potencia para los 6 movimientos anatómicos del hombro.

En la figura 93 se presenta el acople por medio de unión cardanica de la unidad de potencia con el sistema mecánico de la máquina de hombro.



Figura 93. Unión cardanica para la transmisión de potencia



Figura 94. Integración del sistema de rehabilitación tele-operado



Figura 95. Integración de la ayuda tecnológica de hombro con el usuario.



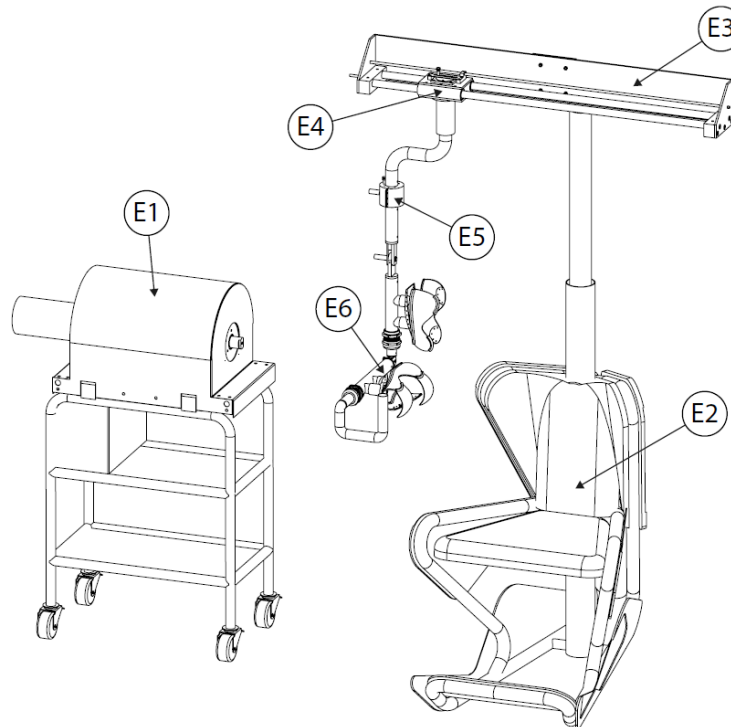
Figura 96. Usuario haciendo uso de la ayuda tecnológica de hombro.

4. Conclusiones

- Debido a que la naturaleza de la arquitectura es estática y esta fue planteada como un sistema a eventos discretos, fue necesario el uso de una herramienta grafica-formal para validar la dinámica del sistema planteado, este modelado en Redes de Petri coloreadas permitieron analizar y validar el comportamiento de un servicio de rehabilitación tele-operado, el comportamiento de las ayudas tecnológicas, el manejo de la información en la base de datos relacionada con especialistas, auxiliares y pacientes y el comportamiento del sistema ante la presencia de las eventualidades que podrían poner en riesgo la integridad física del paciente, esta validación con la herramienta permitió definir los requerimientos de diseño de los servicios web y las características técnicas para la implementación del sistema de rehabilitación.
- El proponer una arquitectura permite que el sistema pueda ser aplicado a otras lesiones osteo-musculares en distintas articulaciones, ya que esta arquitectura caracterizó cada articulación de acuerdo al número de los grados de libertad y los ángulos máximos y mínimos definidos por la anatomía y biomecánica de la articulación, además esta arquitectura puede ser llevada a otros campos de la salud humana, como es el del diagnóstico a distancia de pacientes, otro campo importante es el manejo de la información de los pacientes y la posible coordinación de este sistema con los sistemas administrativos que tiene cada uno de los centros de salud en Colombia.
- Debido a que la implementación de la arquitectura se realizó por medio de servicios web, y cada servicio tiene definida una función muy específica, facilita la modularidad del sistema y su escalabilidad a otras aplicaciones médicas.

ANEXO 1: PROTOCOLO DE VERIFICACIÓN MECÁNICA DE LA AYUDA TÉCNICA TELEASISTIDA DE HOMBRO.

Este documento es una guía para realizar la actividad de verificación del funcionamiento de la ayuda técnica tele asistida de hombro. Dada la cantidad tan grande de dimensiones solicitadas y la cantidad de interacciones entre componentes, se determina realizar una inspección de dimensiones al azar por elemento, y una verificación de las funciones críticas de los conjuntos de ensamble o sub-ensamble como se lista a continuación.



FASE 1. CONTEO DE COMPONENTES INDIVIDUALES.

El resultado de esta actividad de verificación de componentes será registrado en forma parcial directamente en copias de planos y en forma definitiva en este documento:

1. Alistar una copia de planos de cada componente (pieza, ensamble y sub-ensamble) empleado para fabricar y asignarla exclusivamente para inspección.
2. Alistar resaltador verde y naranja para identificar conformidades y no conformidades en el plano.

3. Tomar cada elemento construido y verificar sus medidas y cantidades en el plano correspondiente.
4. Utilizar pie de rey convencional para verificar las dimensiones seleccionadas en el elemento construido.
5. Si las dimensiones están conformes entonces se adiciona una marca de chulo resaltando la dimensión verificada.
6. Cuando todos los planos tengan marcas de chulo resaltando todos los nombres y todas las cantidades correspondientes, entonces se trasladará el resultado consolidado mediante una marca de ok encima de la siguiente línea:

Tabla A1.1 Verificación de los componentes

	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN (FORMA/VISUAL)	CUMPLE (SI/NO)	CANTIDAD	CUMPLE (SI/NO)
1	Ant1	Barra # 1, Antebrazo	Si	1	si
2	Ant2	Barra # 2, Antebrazo	Si	1	si
3	Bra1	Barra # 1, Brazo	Si	1	si
4	Bra2	Barra # 2, Brazo	Si	1	si
5	Eslabón	Sup Barra Superior	Si	1	si
6	Base Torre	Tubo # 1, Torre Principal	Si	1	si
7	Extensor Torre	Tubo # 2, Torre Principal	Si	1	si
8	Bastidor	Subensamble Bastidor	Si	1	si
9	Carro	Subensamble Carro	Si	1	si
10	Seguro Riel	Seguro de guía, Bastidor	Si	2	si
11	Unión	Subensamble Unión	Si	1	si
12	Unión Superior	Rotula # 1, Eslabón Superior	Si	1	si
13	Unión Inferior	Rotula # 2, Brazo	Si	1	si
14	Codo B	Codo B, Brazo	Si	1	si
15	Codo A	Codo A, Antebrazo	Si	1	si
16	Pin Codo	Unión Rotula	Si	1	si
17	Mango	Subensamble Mango	Si	1	si
18	Unión Férula	Elemento de unión Férulas	Si	4	si

19	Barra Deslizador	Barra riel deslizador, Bastidor	Si	2	si
20	Seguro Sillín	Seguro tipo sillín de bicicleta 23mm	Si	2	si
21	Perno Hexagonal	M5x0_8x8 ANSI B18_2_3_5M	Si	16	si
22	Ensamble General	Ensamble General	Si	1	si

Tabla A1.2 Verificación Estructural Fase I

ITEM	FUNCION	RANGO	METODO	ACTIVIDAD	CUMPLE (SI/NO)
1	DESLIZAMIENTO CARRO	480 mm	REGLA	Empujar el carro en ambos sentidos sobre las guías verificando deslizamiento sin atascamientos	si
2	ROTACION EJE VERTICAL	+360°	VISUAL	Rotar el brazo #1 verticalmente en ambos sentidos verificando rango y rotación suave sin atascamientos	si
3	ROTACION EJE HORIZONTAL	140° - 0°	GONIOMETRO	Rotar el brazo #2 verticalmente en ambos sentidos verificando rango y rotación suave sin atascamientos	si
4	EXTENSION ANTEBRAZO	+50mm	PIE DE REY	Extender y retraer en ambos sentidos verificando rango y deslizamiento suave sin atascamientos	si
5	FIJACION MEDIANTE ABRAZADERAS (X2)	ACTIVO/INACTIVO	TACTO	Verificar bloqueo (ACTIVADO) y deslizamiento libre (desactivado) de los tubos a fijar	si
6	FIJACION TORRE	POS1, POS2, POS3	VISUAL/TACTO	Verificar que el pin de posicionamiento se puede insertar fácilmente	si
7	TRANSMISION EJE HORIZONTAL	+360°	VISUAL	Hacer rotar el eje de entrada con llave boca fija y verificar rotación suave del eje de salida en ambas direcciones	si
8	FRENO DE FRICCIÓN VERTICAL	ACTIVO/INACTIVO	TACTO	Verificar que con el freno activado, se siente restricción cuando se intenta la rotación del eje vertical	si
9	FRENO DE FRICCIÓN HORIZONTAL	ACTIVO/INACTIVO	TACTO	Verificar que con el freno activado, se siente restricción cuando se intenta la rotación del eje horizontal	si
10	PIN DE ACOPLE/DESACOPLE	ACTIVO/INACTIVO	VISUAL/TACTO	Accionar el pin mientras se realiza la rotación manual del eje, verificando la	si

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

	OPLE HORIZONTAL			transmisión o interrupción del movimiento	
12	PIN DE ACOPLE/DESAC OPLE VERTICAL	ACTIVO/INACTIVO	VISUAL/TACTO	Accionar el pin mientras se realiza la rotación manual del eje, verificando la transmisión o interrupción del movimiento	si

Esta fase se llevará a cabo en el taller del fabricante y tiene por objetivo verificar que como conjunto funcionen adecuadamente todos los elementos del sistema del mecanismo y la estructura que son responsabilidad del fabricante. Estas verificaciones pueden hacerse en forma parcial durante la fabricación, pero solo serán válidas cuando el sistema se encuentre en su estado de pintura y acabados finales. En este formato, se procederá a marcar con lapicero color rojo.

Tabla A1.3: Verificación Estructural Fase I

ITEM	FUNCION	RANGO	METODO	ACTIVIDAD	CUMPLE (SI/NO)
1	ROTACION LIBRE MOTOR VERTICAL	+360°	VISUAL/TACTO	Accionar el brazo de salida para hacer girar el eje de la transmisión en forma continua varias vueltas y verificar que puede rotar sin atascarse en ningún momento	si
2	ROTACION LIBRE MOTOR EJE HORIZONTAL	+360°	VISUAL/TACTO	Accionar el brazo de salida para hacer girar el eje de la transmisión en forma continua varias vueltas y verificar que puede rotar sin atascarse en ningún momento	si